



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**“COMPORTAMIENTO DE LA EXCAVACIÓN  
DE LA CASA DE MÁQUINAS Y GALERÍA  
DE OSCILACIÓN DEL PROYECTO  
HIDROELÉCTRICO EL CAJÓN”**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:**  
**I N G E N I E R O C I V I L**  
**P R E S E N T A:**  
**ARACELI RAMÍREZ DE LA ROSA**



**MEXICO, D.F.**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**M.I. REGINALDO HERNÁNDEZ ROMERO**

**SEPTIEMBRE 2006**



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/021/06

Señorita  
ARACELI RAMÍREZ DE LA ROSA  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. REGINALDO HERNÁNDEZ ROMERO, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"COMPORTAMIENTO DE LA EXCAVACIÓN DE LA CASA DE MÁQUINAS Y GALERÍA DE OSCILACIÓN DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO EL CAJÓN"**

- INTRODUCCIÓN
- I. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO EL CAJÓN
- II. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS OBRAS DE GENERACIÓN
- III. PLANEACIÓN DE EXCAVACIÓN
- IV. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA CASA DE MÁQUINAS Y DE LA GALERÍA DE OSCILACIÓN
- V. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 17 de abril del 2006.  
EL DIRECTOR

  
M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO  
GFB/AJP/crc.

*V.Bo*  
*M.I. Reginaldo Hernández Romero*  
*24/08/06*

*Z. Martaya B*

*V.Bo*  
*[Signature]*

*[Signature]*

*V.Bo*  
*[Signature]*  
*Ing. Ernesto René Mendoza Sánchez*  
*24-ago-06*

Dedicado a

A la memoria de mis abuelos Raúl y Genoveva, a mi tío Raúl y a mi amiga Irma (†).

Mamá este es un pequeño homenaje a nuestro esfuerzo, a tu sabiduría para guiarme y poder llegar hasta donde estoy.

¡Gracias mamá disfrútalo es tuyo!

A la fuente de mi inspiración, de fortaleza; a ti Renato que además de ser mí esposo y compañero en todo momento eres el pilar de mi vida

A Paola Montserrat, mi hija, la luz de mi camino.

*Agradecimientos:*

*A Dios*

Por permitirme vivir.

*A Renato*

Por todos y cada uno de los momentos que hemos compartido desde el día en que nos conocimos. Por tu apoyo, comprensión, por tu ejemplo de entereza, por impulsarme hacia adelante, por recorrer esta vida a mi lado tomados de la mano, por tu amor, por ser mi motivo, por nuestra hija. Te amo Ren.

*A mi Mamá*

Gracias mamá por tus desvelos, por estar siempre a mi lado, por todo el esfuerzo y el amor que me has dado a lo largo de mi vida. Porque todos mis logros son también tuyos. Por ti soy lo que soy, por ti he llegado hasta aquí. Gracias.

*Al M. I. Reginaldo Hernández Romero*

A quien respeto por su sabiduría, por sus consejos, por ayudarme a terminar una fase de mi vida, y por su amistad.

*A Ulises*

Por tu paciencia, por tu amistad, por estar desde el principio hasta el final de este trabajo. Gracias por tu tiempo. Este logro también es tuyo.

*A los Ingenieros Enrique Mena Sandoval, Gabriel Macedo Gómez y Clara Javier Castro*

Por brindarme su apoyo y confianza en mi formación como ingeniero.

*A mis amigos*

Quienes son parte de mi vida. Gracias a todos ellos por los momentos pasamos buenos y malos que valen la pena recordar.

*A mis profesores*

Que son parte de mi formación y que algunos me brindaron además su amistad.

*A mis sinodales*

Por estar presentes en el cierre de este proyecto y por su amistad.

**COMPORTAMIENTO DE LA EXCAVACIÓN DE LA  
CASA DE MÁQUINAS Y GALERÍA DE OSCILACIÓN  
DEL PROYECTO HIDROELÉCTRICO EL CAJÓN**



<b>CONTENIDO</b>	<b>PAGINA</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO P.H. EL CAJÓN</b>	<b>3</b>
1.1 Ubicación	3
1.2 Datos Técnicos	4
1.3 Características Generales	5
1.4 Geología regional	9
1.4.1 Rocas Volcánicas Extrusivas	11
1.4.2 Rocas Volcánicas Intrusivas	12
1.4.3 Depósitos Recientes	13
1.5 Geología de sitio	14
1.5.1 Litología	14
1.6 Geología estructural	16
1.6.1 Fallas	16
<b>2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS OBRAS DE GENERACIÓN</b>	<b>20</b>
2.1 Obra de toma	21
2.2 Tuberías de presión	21
2.3 Casa de Máquinas	22
2.4 Galería de Oscilación	23
2.5 Túnel de desfogue	23
2.6 Subestación y plataforma de transformadores	24
2.7 Lumbrera de buses	24
<b>3 PLANEACIÓN DE EXCAVACIÓN</b>	<b>25</b>
3.1 Túnel de acceso a Casa de Máquinas y Galería de Oscilación	25

3.2	Túnel de desfogue	27
3.3	Casa de Máquinas	28
3.3.1	Fosos de turbinas	29
3.3.2	Cárcamo de bombeo y galería de drenaje	29
3.4	Túneles de aspiración	30
3.5	Galería de Oscilación	31
3.5.1	Trabe de compuertas	33
3.6	Lumbreras y túneles auxiliares	33
3.6.1	Lumbrera de buses	33
3.6.2	Lumbreras de cables	34
3.6.3	Lumbreras de ventilación	34
3.7	Tuberías a presión	34
<b>4</b>	<b>EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA CASA DE MÁQUINAS Y DE LA GALERÍA DE OSCILACIÓN</b>	<b>37</b>
4.1	Sistema de Auscultación	37
4.1.1	Características generales de la instrumentación	38
4.1.2	Instrumentación instalada en Casa de Máquinas y Galería de Oscilación	41
4.1.2.1	Casa de Máquinas	42
4.1.2.2	Galería de Oscilación	46
4.2	Comportamiento de Casa de Máquinas y Galería de Oscilación	48
4.2.1	Casa de Máquinas	48
	2	
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>81</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>82</b>



## **INTRODUCCIÓN**

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el comportamiento de Casa de Máquinas y Galería de Oscilación en el Proyecto Hidroeléctrico El Cajón, con base en los resultados de las mediciones obtenidas de la instrumentación instalada durante la construcción de la presa y hasta el mes de diciembre de 2005.

En el capítulo 1 de este trabajo se presenta la descripción general del proyecto, en el capítulo 2 se describen de las características de las obras de generación, en el capítulo 3 el procedimiento de excavación para las obras de generación, y en el capítulo 4 se presenta de forma general la instrumentación instalada en la presa y se trata el tema del comportamiento de Casa de Máquinas y Galería de Oscilación.

Con el fin de satisfacer las necesidades de suministrar más energía eléctrica en el país, la Comisión Federal de Electricidad impulsa la construcción desde el año 2003 de la nueva Central Hidroeléctrica El Cajón, aprovechando el caudal del Río Santiago en el Estado de Nayarit, la cual se estima será puesta en funcionamiento para el año 2007.

El Proyecto Hidroeléctrico El Cajón, se construye a 47 km en línea recta de la ciudad de Tepic en el Estado de Nayarit en el cauce del Río Santiago, construida la presa con una cortina de Enrocamiento Con Cara de Concreto (CFRD), con una altura total de desplante de 187.7 m de altura, es una de las más altas a nivel mundial en su tipo.

La Central Hidroeléctrica tiene la característica de contar con dos turbinas tipo Francis que son las más grandes que se han instalado en México, con una capacidad de 375 MW cada una y que aportarán al Sistema Nacional el 2 % de la producción de energía eléctrica.

Para determinar el modelo geológico del subsuelo donde se alojaron cada una de las estructuras del proyecto, se llevaron a cabo una serie de exploraciones con métodos directos e indirectos tales como tendidos sísmicos de refracción y sondeos eléctricos verticales.

Con base a dichos estudios, se detectaron rocas de diversa litología y edad, las obras civiles se encuentran emplazadas la mayoría, en roca de origen volcánico, llamada ignimbrita, la cual, se subclasificó en tres unidades geológicas. Intercaladas en estas unidades, existen dos horizontes aglomeráticos que en conjunto con diques y zonas de intenso callamiento?, forman bloques y sub-bloques. Destaca el hecho de que superficialmente la roca presenta un espesor variable de roca alterada.

Con estos estudios se concluyó que la margen derecha muestra mejores condiciones que la margen izquierda, ésta última se encuentra más afectada por alteración y relajamiento, y mayor número de fallas.

Dada la importancia de la obra, es necesario contar con un sistema de auscultación diseñado específicamente para cada una de las obras, llevar un adecuado control del mismo y darle seguimiento.

Con objeto de verificar que el comportamiento de una estructura este de acuerdo con lo estimado en el diseño, es necesario colocar durante la construcción, instrumentación en puntos específicos, los cuales deben ser monitoreados periódicamente, a fin de analizar y evaluar el comportamiento de la estructura es acorde con lo estimado en el diseño, o bien indicar las medidas necesarias que permitan garantizar la estabilidad de la estructura.

En Casa de Máquinas y Galería de Oscilación, se colocaron un total de 49 extensómetros de 3 y 4 barras, 35 de ellos se instalaron en Casa de Máquinas (bóveda, pared de aguas arriba y abajo) y 14 en Galería de Oscilación (bóveda, pared de aguas abajo y arriba).

El periodo de comportamiento que se evalúa comprende de la fecha de instalación de cada instrumento en el año de 2004 hasta el mes de Diciembre de 2005.

El sistema de auscultación propuesto para las estructuras civiles del P. H. El Cajón, es parcialmente automatizado; lo cual permite obtener información de parámetros en zonas seleccionadas con oportunidad, lo que permite una reducción de tiempos de lectura y proceso de datos, disminuyendo costos asociados; reduciendo errores de medición, e incrementa la confiabilidad de la información. La instrumentación no automatizada obligará a realizar recorridos en sitios específicos de la obra para complementar la información con mediciones manuales y con inspecciones frecuentes

# 1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO P.H. EL CAJÓN

## 1.1 Ubicación

El Proyecto hidroeléctrico El Cajón forma parte del Sistema Hidrológico Santiago, se localiza en el estado de Nayarit a 47 Km en línea recta al Sureste de la ciudad de Tepic, en el Municipio de Santa María del Oro, sobre el curso del Río Santiago (Fig.. 1). Se encuentra a 77 km aguas arriba del Central Hidroeléctrica Aguamilpa-Solidaridad.

El acceso definitivo comunica a los poblados de Cerro Blanco, Rincón de Calimayo y El Buruato, es un camino de 42 km de longitud a partir de la autopista a Guadalajara y 75 km desde Tepic.

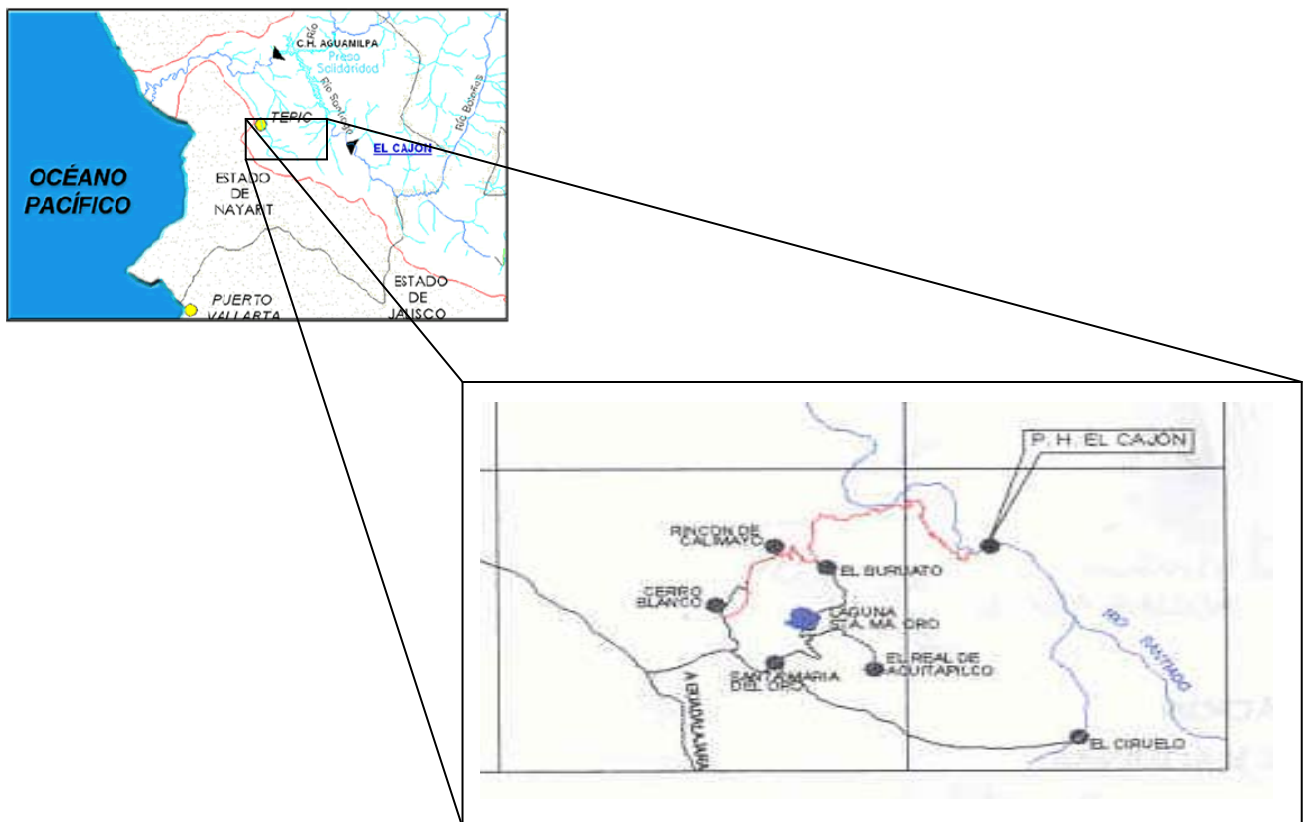


Fig.1 Ubicación del P.H. El Cajón.

Es importante indicar que las estructuras volcánicas más importantes, por su relativa cercanía al proyecto, son la Laguna de Santa María del Oro y el volcán Ceboruco.

## 1.2 Datos Técnicos

### Cortina.

Tipo	Enrocamiento con cara de concreto
Elevación de corona	396.5 m. s. n. m.
Longitud de corona	550 m
Altura máxima	187.87 m

### Embalse.

Área ocupada al NAME	3982 ha
NAME	394 m. s. n. m.
NAMO	391 m. s. n. m.
NAMino	346 m. s. n. m.
Capacidad al NAME	2369 Mm <sup>3</sup>
Capacidad al NAMO	2252 Mm <sup>3</sup>
Capacidad al NAMino	936 hm <sup>3</sup>

### Hidrología

Área de la cuenca	54198 km <sup>2</sup>
Volumen medio anual	4077 hm <sup>3</sup>
Volumen aprovechable	2970 hm <sup>3</sup>
Gasto medio mensual	101 m <sup>3</sup> /s

### Obra de desvío

Túneles	2
Longitud total	706 y 786 m
Dimensión (sección portal)	14 x 14 m
Capacidad de descarga	6481 m <sup>3</sup> /s

### Obra de excedencias

Estructura de descarga	2 canales de eje recto
Gasto de diseño	14864 m <sup>3</sup> /s
Compuertas (6 radiales)	12 x 20 m

### Obras de generación

Turbinas tipo Francis	2
Tubería a presión	2
Dimensiones	7.25 x 140.9 m
Casa de Máquinas (dim)	103.5 x 22.2 x 49.50 (largo x ancho x altura) m
Galería de Oscilación (dim)	66.70 x 16 x 52.75 m
Gasto de diseño p/unidad	259.77 m <sup>3</sup> /s
Carga neta de diseño	156.54 m
Capacidad instalada	750 MW
Potencia por cada unidad	375 MW
Factor de planta medio	0.187

### 1.3 Características Generales

Las obras civiles que forman este proyecto son: obra de desvío, obra de contención (cortina), obra de generación (Casa de Máquinas) y obra de excedencias (vertedor) (Fig. 2); las cuales se describen brevemente a continuación:

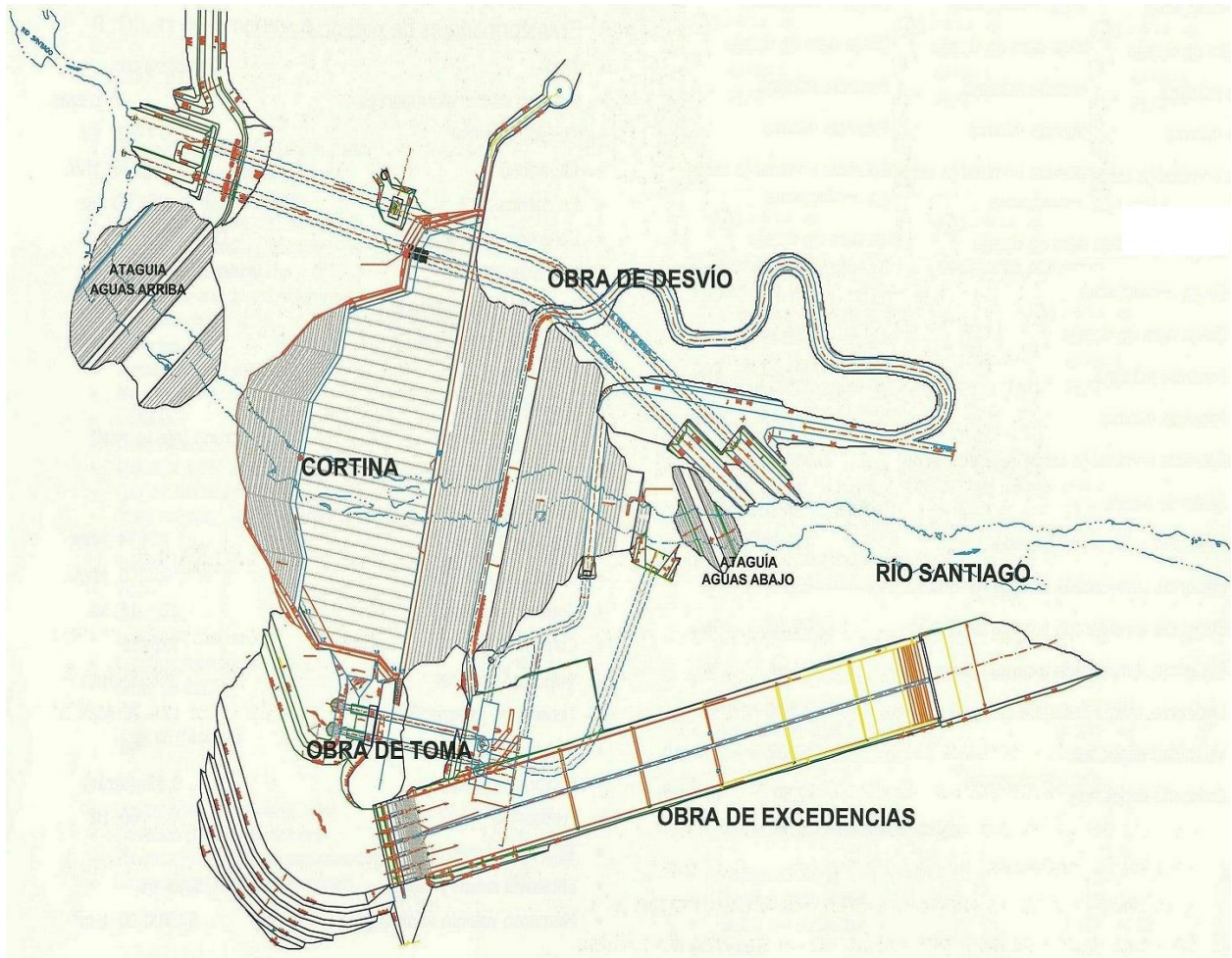


Fig.2 Obras civiles en el proyecto El Cajón Nay.

*Obra de desvío* (Fig. 3), obra subterránea alojada en la margen izquierda del río, está formada por las ataguías de aguas arriba y de aguas abajo, así como por dos túneles de 706 y 786 m de longitud total de sección portal de 14 m de ancho y altura, que permitirán manejar una avenida con periodo de retorno de 100 años. La superficie de excavación de los túneles tendrá un revestimiento con concreto lanzado y se aplicará un tratamiento a la roca de estas obras subterráneas.

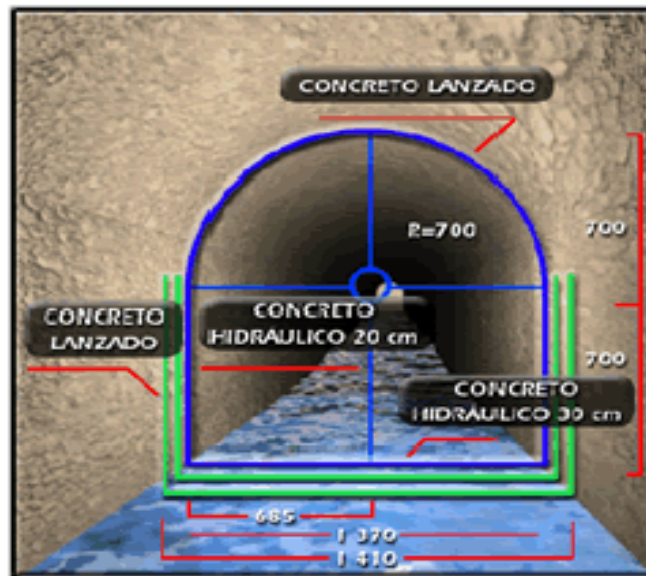


Fig.3 Obra de desvío de río

*Obra de contención* (Fig. 4), está formada por una cortina de enrocamiento con cara de concreto (ECC) con corona a la elevación 396.5 m. s. n. m, lo que implica una presa del orden de 187.87 m de altura. El material para su construcción es obtenido de la explotación de canteras de roca y de la excavación de la obra de excedencias, se estima que se van a triturar 18.5 millones de toneladas de roca para obtener los materiales graduados de la cortina.

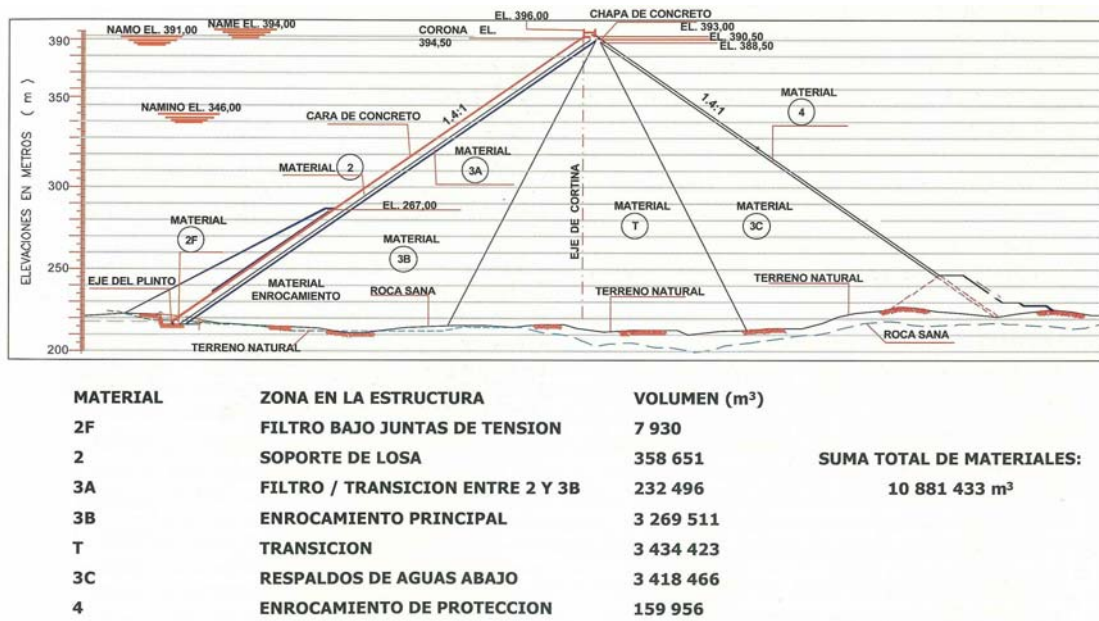


Fig.4 Cortina

Obra de generación (Fig. 5) Consiste en un conjunto de obras subterráneas ubicadas en la margen derecha, comenzando con un canal de obra de toma (obra superficial), dos conductos a presión de 7.95 m de diámetro y 260 m de longitud, una Casa de Máquinas de 22.2 m de ancho, 103.5 m de largo y 49.2m de altura en caverna con dos unidades tipo Francis, una Galería de Oscilación aguas abajo donde el agua proveniente de las turbinas pierde velocidad y un canal de desfogue de sección portal de 13.90 m. Se incluye una subestación encapsulada tipo SF6 y se prevén 2 líneas de transmisión de 400 KV para interconectarlo al Sistema Eléctrico Nacional.

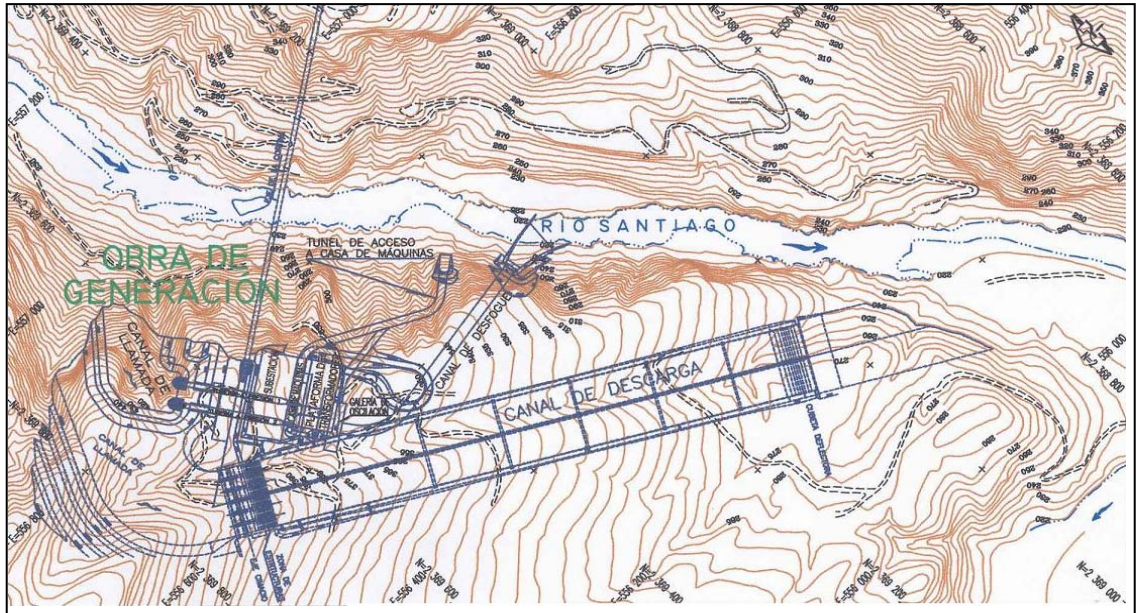


Fig.5 Obras de Generación

Obra de excedencias (vertedor) (Fig.. 6), formada por un canal a cielo abierto con capacidad para desalojar un gasto de 14 864 m<sup>3</sup>/seg. Ubicado en la margen derecha, constituido por una losa de piso dividido con un muro separador de 700 m de longitud por 100 m de ancho, la estructura de control se prevé con 6 compuertas radiales de 12 x 20 m.

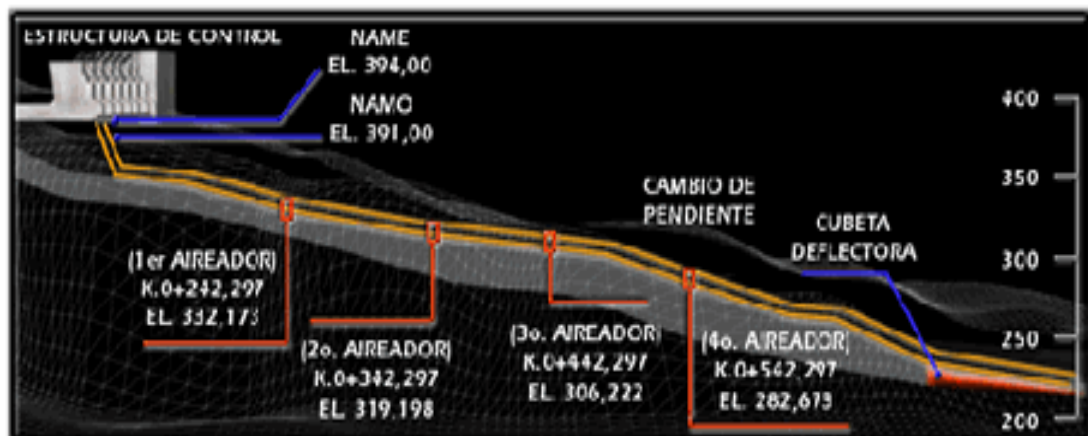


Fig.6 Obra de excedencias



### 1.4 Geología regional

El sitio se ubica en la porción sur de la Sierra Madre Occidental (Fig. 7), zona caracterizada por pequeñas sierras separadas por estrechos valles de mediana profundidad que se amplían hacia el Pacífico, sierras que están formadas principalmente por una secuencia volcánica de composición riodacítica, en la que predominan las rocas piroclásticas intercaladas con algunas coladas basálticas, procedentes de aparatos volcánicos cercanos.

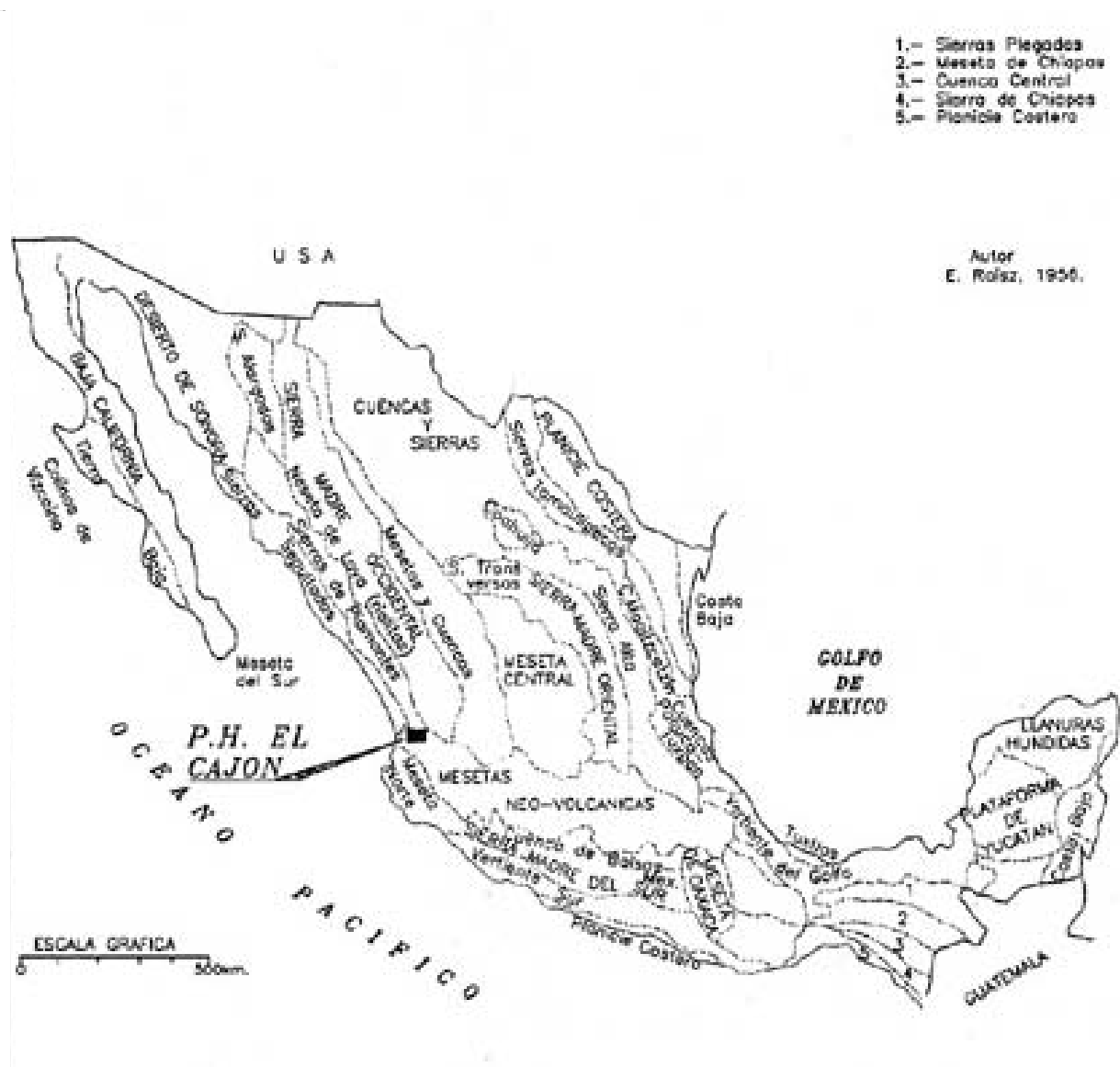


Fig.7 Ubicación fisiográfica del Cajón

La zona del proyecto está constituida por rocas volcánicas de diferentes tipos, entre ellas rocas ígneas intrusivas y rocas metamórficas; localmente la zona de estudio se sitúa en el

bloque denominado “El Cajón”, el cual está limitado al este por el Bloque “Manga Larga” y al oeste por el “Cantiles”.

Morfológicamente se pueden diferenciar dos zonas:

Las zonas altas, por encima de los 700 m.s.n.m. formadas por los picos y cadenas de cerros más altos con pronunciados escarpes, que corresponde a una etapa geológica juvenil-madura.

Las zonas medias y bajas que varían de la cota 220 a la 700 en que se alternan mesetas y terrazas alargadas casi horizontales, con laderas de pendientes irregulares que a veces son abruptas muy cerca del cauce del río, formando entradas y salientes de origen estructural.

En las etapas de exploración y caracterización del macizo rocoso se estableció la secuencia lito-estratigráfica del sitio (Fig. 8), la cual se describe a continuación en orden cronolítico:

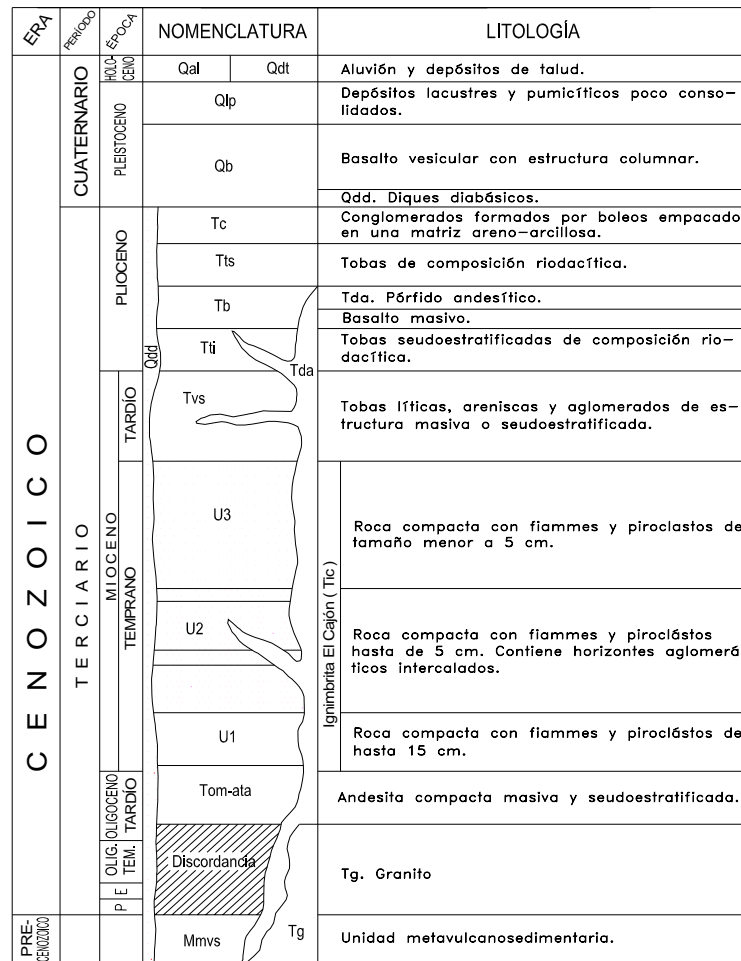


Fig.8 Columna Litológica Esquema de la Geología General del sitio

### **1.4.1 Rocas Volcánicas Extrusivas**

#### ***Unidad Meta-vulcanosedimentaria (Mvs)***

Unidad formada por intercalaciones de lavas y tobas andesíticas, así como por grauvacas (roca sedimentaria de grano fino que contiene abundantes fragmentos de roca) y areniscas. Su distribución está restringida al extremo NW en ambas márgenes del río, su espesor se desconoce.

#### ***Ignimbrita El Cajón (Tic)***

Está constituida por ignimbritas de composición predominantemente riodacítica. La roca mecánicamente es competente, densa, masiva, de alta dureza y no se altera fácilmente, por lo que se le considera de buena calidad. Se le ha calculado un espesor de 600 m.

En esta unidad quedarán la Casa de Máquinas, Galería de Oscilación y partes del canal de llamada de la obra de toma, tuberías de presión, lumbrera de buses y ventilación y túnel de desfogue.

#### ***Unidad Vulcano-sedimentaria (Tvs)***

Esta compuesta por una secuencia alternante de tobas híbridas con arenas arcillosas, areniscas tobáceas, tobas líticas y aglomerados, con granulometría variable desde granos finos hasta bloques medianos, de estructura masiva o estratiforme (tiene variantes a estratificación cruzada y desde laminar hasta estratos de 2 m de espesor) con cambios granulométricos graduales. Estos depósitos son bastante vulnerables al intemperismo, sus afloramientos más notables son los expuestos cerca de las fallas El Contacto y Sobaco en la margen derecha, en la zona del manantial de aguas termales y en las partes altas en la margen izquierda. El espesor inferido de esta unidad es de 350 m.

#### ***Toba Inferior (Tti)***

Es una roca de composición riodacítica. Estructuralmente se comporta como un cuerpo estratiforme que aflora en forma alargada. Se presenta en la margen derecha en la porción norte, sobre el arroyo de la falla Sobaco. Su espesor se ha definido entre 60 y 70 m. descansa concordantemente sobre la secuencia vulcano-sedimentaria (Tvs) y se encuentra cubierta por los basaltos terciarios (Tb).

***Basalto Terciario (Tb)***

Son basaltos de augita, homblenda y olivino, sus afloramientos son alargados (de varios kilómetros de longitud); se presentan en ambos márgenes al NNW y SSW del área estudiada. Su espesor es de aproximadamente 100 m.

***Toba Superior (Tts)***

Es una roca similar a la toba inferior difiriendo tanto en su espesor que es alrededor de 100 m, como en la ausencia de intrusivos.

***Basalto Cuaternario (Qb)***

Son rocas de estructura columnar, con vesículas, presentan un espesor en la margen izquierda del proyecto de 15 a 20 m, aguas abajo del eje se encuentra cubriendo discordantemente a las ignimbritas de la zona donde se ubican las estructuras de las obras de generación.

## ***1.4.2 Rocas Volcánicas Intrusivas***

***Granito (Tg)***

Es de textura porfidica, masivo, compacto, con dureza alta. Aflora en la porción oeste del área, aguas abajo de eje de socavones. Debido a una falla se encuentra en contacto con una secuencia tobácea. En amplias zonas una intemperización es profunda, provocando gruesos horizontes de arena suelta poco compacta.

***Diques Andesíticos (Tda)***

Tiene textura porfidica con grandes fenocristales de plagioclasas (de 1 a 2 cm) en un matiz de grano fino (afanítica). Aflora en ambos márgenes del área, principalmente por el camino de acceso al sitio. La roca que forma estos diques es fácilmente intemperizable, con espesores de 10 a 12 m.

***Diques Diabásicos (Qdd)***

Se encuentran afectando a toda la secuencia tobácea, son de composición andesítico-basáltica, sus afloramientos se presentan generalmente alterados, observándose arcilla y esporádicamente calcita. En la superficie los diques están intemperizados, su dureza es muy baja, y forma una arcilla expansiva de tipo montmorilonítica. En el subsuelo estos intrusivos son de dureza media a baja y en la excavación del túnel de exploración se pueden observar

compactos en estado natural pero cuando pierden humedad provocan desprendimiento de bloques importantes, que ponen en evidencia zonas potencialmente inestables. Sus espesores van de 1 a 2.50 m, en el arroyo Los Diques, en la margen derecha cerca de la zona del eje se tiene un gran afloramiento de esta unidad. Afecta directamente en las obras subterráneas de Casa de Máquinas y Galería de Oscilación.

### ***1.4.3 Depósitos Recientes***

#### ***Depósito Conglomerático (Tc)***

Esta constituido por boleos y bloques de tamaños que oscilan entre 0.9 y 1 m, empaçados en una matriz que varia de arcilla-arenosa a grava fina, pobremente cementada. Sus espesores varían de 5 a 10 m como mínimo, algunos afloramientos se presentan muy cercanos a la falla Sobaco, otros en la zona del portal del socavón 1 y en las proximidades de la falla V.

#### ***Depósitos Lacustres y Pumiciticos (Qlp)***

Esta roca vulcano-sedimentaria (híbrida) contiene elementos piroclásticos representados por depósitos pumicitas y epiclásticos interestratificados representados por depósitos limo-arcillosos de origen lacustre, aflora en el área del antiguo campamento y por el arroyo de la falla IV, se puede observar estratificación cruzada y graduada. Los espesores alcanzan hasta los 35 m.

#### ***Aluvión (Qal)***

Esta unidad se compone de gravas y arenas mal graduadas, sin cementación y transportadas por el río Santiago y sus afluentes. Los espesores estimados de aluvión fueron variables, con un máximo de 24 m en la zona de proyecto.

#### ***Depósitos de talud (Qdt)***

Estos materiales en general están sueltos, tanto en granulometría como en composición, son muy heterogéneos y su tamaño varía desde arcillas hasta grandes bloques mayores a 3.50 m de diámetro. Los espesores de los depósitos varían de 1.50 a 15 m.

El afloramiento más importante se localiza en la ladera donde se ubica el canal de llamada de la obra de toma, debido al cambio de pendiente y a la influencia de las fallas en cotas más elevadas lo que puede provocar el desprendimiento de material inestable que rellena a las cañadas que descienden hacia el Santiago.

## 1.5 Geología de sitio

Para conocer con mayor precisión el modelo geológico del subsuelo donde quedarán alojadas cada una de las obras de generación, se llevó a cabo una serie de exploraciones con métodos directos que consistieron en levantamientos detallados de geología superficial, perforación de diamante y excavación de túneles. Se realizaron, además, estudios geofísicos, específicamente tendidos sísmicos de refracción y sondeos eléctricos verticales.

El macizo rocoso está constituido por la ignimbrita riodacítica El Cajón, la cual se ha dividido en tres unidades (U1, U2, U3)

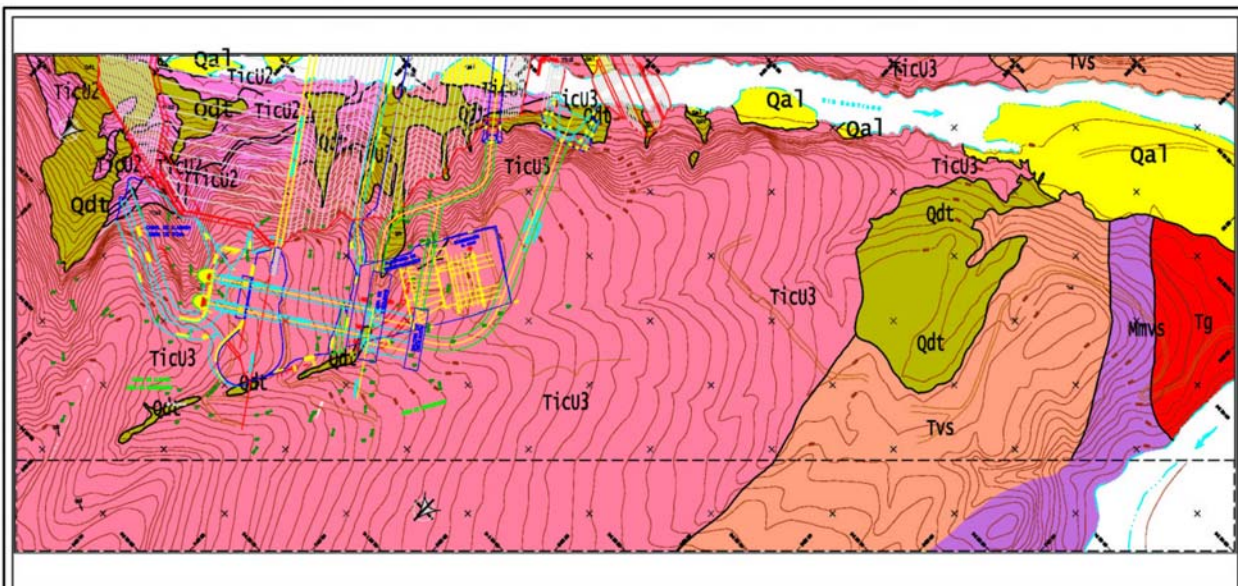


Fig.9 Esquema de la Geología General del sitio

### 1.5.1 Litología

La zona de la boquilla se ubicará principalmente en la ignimbrita El Cajón, que a su vez, por la variación en su textura, se dividió en tres unidades (Fig. 9), las cuales se describen a continuación:

### ***Unidad TicU1***

Está conformada por rocas compactas, de dureza alta con pseudo-estratificación gruesa (mayor de 4 m). Los afloramientos de esta unidad se distribuyen en ambas márgenes en la vecindad del cauce. Se le ha estimado un espesor de 150 a 200 m presenta su contacto con la Unidad U2, a la cual subyace, un aglomerado constituido por bloques de rocas intermedias y básicas principalmente, cuyo tamaño varía de 5 a 20 cm.

### ***Unidad TicU2***

Se observa la predominancia de composición andesítica, y de fragmentos de pómez alargados menores a 5 cm. Generalmente estas rocas son compactas y con dureza alta, su estructura es pseudo-estratificada con espesores variables entre 3 y 5 m. Su cima está formada por un horizonte aglomerático, que tiende a ser de forma irregular, de 2 a 5 m de espesor, está constituido por bloques y fragmentos sub-angulosos y sub-redondeados, en su mayoría de pórfidos andesíticos con tamaños que varían entre 5 cm y 4 m. Este horizonte marca el contacto con la Unidad U3. Asimismo, se tiene otro horizonte aglomerático, irregular y discontinuo en la parte media inferior de la unidad, confundándose a veces con el de la cima de la Unidad U1, aflora a orillas del cauce en ambas márgenes. Sus principales afloramientos se encuentran en ambas márgenes del río Santiago, aguas arriba del eje de Socavones, estas rocas se encuentran subyaciendo concordantemente a la Unidad U3. La roca mecánicamente es competente, densa, masiva, de alta dureza y no se altera fácilmente, por lo que se le considera de buena calidad.

En esta unidad geológica quedarán construida la Casa de Máquinas (Fig.5 ), la Galería de Oscilación y partes del canal de llamada de la obra de toma, así como la tuberías de presión, la lumbrera de buses y ventilación y túnel de desfogue.

### ***Unidad TicU3***

Su textura es piroclástica con presencia de litofisas de pómez (de tamaño menor a 5 cm.) Son rocas compactas, duras y con pseudoestratos que varían de gruesos a delgados (0.25 a 1.50 m), a veces intercalados con arcilla. Presenta un contenido y tamaño menor de litofisas de pómez y clastos en comparación con las otras Unidades. El espesor reportado en la margen derecha para esta unidad varía de 76.40 a 148.15 m. En el área estudiada es la más ampliamente distribuida y se encuentra expuesta sobre las orillas del cauce desde el eje Socavones hasta 830 m aguas abajo, extendiéndose hasta las partes altas en ambas márgenes. Se le ha estimado un espesor de 290 m, cubre la Unidad U2 y subyace en ligera discordancia a los depósitos vulcano-sedimentarios. Sus características geomecánicas corresponden a una roca de dureza meda a alta, masiva, bien compacta y de regular a buena calidad.

Estas rocas tienen una distribución importante en la margen derecha, y las obras que quedarán empotradas en ellas son la plataforma de transformadores, subestación, gran parte

del canal de llamada de la obra de toma, parte de la lumbrera de buses y de la ventilación, así como del túnel de desfogue.

### ***Unidad Vulcano-sedimentaria***

Esta Unidad se presenta en los primeros 43 m de la base de la cima, como un aglomerado volcánico muy litificado, con estratificación gruesa de apariencia masiva, los fragmentos de la roca son sub-angulosos, sub-redondeados con tamaños hasta de 40 cm, en general son rocas porfídicas ácidas e intermedias, sus fracturas están rellenas de calcita y arcilla.

### ***Otras Unidades***

Otras de las Unidades litológicas de poca extensión presentes en el sitio son los depósitos conglomeráticos que rellenan paleocauces y depresiones antiguas del terreno preservadas por terrazas de basalto, que los cubre y finalmente los depósitos de talud que alcanzan sus mayores espesores hasta 35 m.

## ***1.6 Geología estructural***

El bloque ignimbrítico El Cajón se sitúa en la parte central, confinado entre dos fallas regionales Sobaco y Cantiles, siendo continuo en ambas márgenes, fragmentándose en sub-bloques escalonados, cayendo hacia la falla Sobaco en forma uniforme.

### ***1.6.1 Fallas***

La margen derecha se encuentra afectada por varias familias de fallas, las fracturas generalmente se presentan cerradas y ocasionalmente abiertas con rellenos arcillosos; las orientaciones preferenciales y los echados que presentan, en cada una de las unidades litológicas, muestran concordancia en la zona de la boquilla. La mayoría de las fallas controlan la topografía de las cañadas afectando a las unidades ignimbríticas El Cajón a la Vulcano-sedimentaria (Fig. 9).

A continuación se enuncian las fallas principales que afectan a cada una de las obras y se describan las principales características de cada una de ellas.



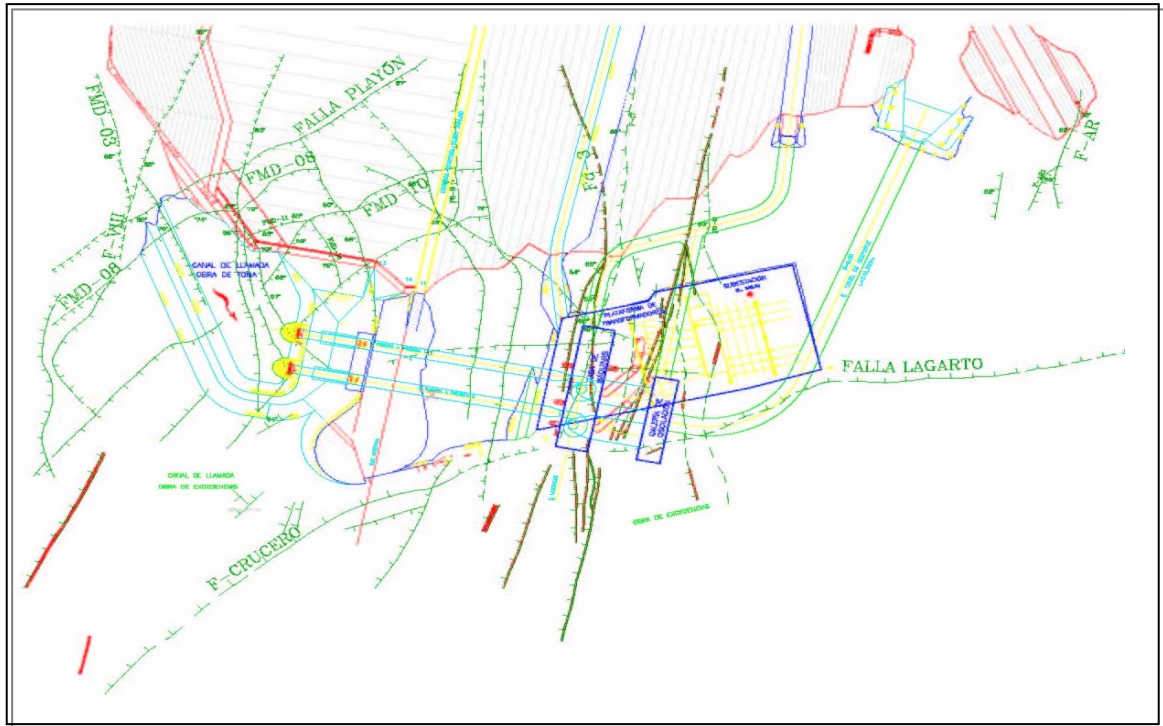


Fig.10 Esquema general de fallas

- **Falla Playón**

Atraviesa el canal de llamada de la obra de toma, con longitud mayor a los 300 m, el espesor de la zona de cizallamiento es de 0.60 m y relleno de milonita y brecha de falla.

Esta falla afecta la zona de excavación del talud derecho del canal de llamada, donde posiblemente se generen bloques inestables hacia el río Santiago, también la permeabilidad se puede ver afectada hacia aguas abajo.

- **Falla F-IV**

Atraviesa en el talud de la porción occidental de la plataforma de transformadores, además afecta también a la bóveda de Casa de Máquinas y la porción fina de la tubería de presión. Su longitud es mayor a los 350 m, y el espesor de la zona de desplazamiento es de 15 m con relleno de roca fracturada y dique en el subsuelo.

- **Falla F-VI**

Atraviesa el talud que divide a la subestación y a la plataforma de transformación, es posible que en el subsuelo atraviese la zona de las tuberías de presión. Su longitud en superficie es de 300 m, y presenta un espesor en la zona de desplazamiento de cizallamiento de 4 m con relleno de roca fracturada y planos con estrías.

- **Falla F-VII**

Atraviesa la entrada del canal de llamada de la obra de toma y afecta las excavaciones a cielo abierto del piso y talud derecho de la obra, presenta una longitud mayor a 250 m, su espesor varía de 0.30 a 6 m presenta un relleno de milonita, brecha de falla y arcilla.

- **Falla F-VII A**

Atraviesa el talud izquierdo y piso del canal de llamada de la obra de toma, se observa una longitud mayor a los 180 m y tiene un espesor en la zona de desplazamiento de 1.50 a 250 m<sup>2</sup> presenta un relleno de milonita y roca fracturada.

- **Falla F-VII B**

Atraviesa el talud izquierdo y piso del canal de llamada de la obra de toma (corresponde a una ramificación de la falla F-VII), su longitud es de 180 m el espesor de la zona de cizalla es de 0.60 m con un relleno de milonita, roca triturada y planos con estrías.

- **Falla F-VIII**

Se localiza al frente del canal de llamada de la obra de toma, su longitud es de más de 200 m, el espesor de la zona de desplazamiento varía de 2.00 a 10 m y presenta un relleno de fracturas con estrías.

- **Falla FMD-08**

Atraviesa el piso y talud derecho del canal de llamada de la obra de toma, su longitud es mayor de 190 m, el espesor de la zona de cizalla varía de 0.10 a 0.20 m y presenta un relleno de roca triturada y planos con estrías.

- **Falla FMD-14**

Se localiza en la zona de los cortes que quedarán entre el plinto y el talud izquierdo del canal de llamada de la obra de toma, muy cerca de la zona donde se excavará la entrada para la tubería de presión 1, con longitud mayor de 170 m el espesor varía de 0.50 a 1.00 m, presenta un relleno de brecha de falla.

- **Falla FMD-15**

Se localiza en el talud izquierdo del canal de llamada de la obra de toma, tiene longitud mayor a los 170 m, un espesor de 4 m, y presenta un relleno de milonita, roca triturada y planos con estrías.

- **Falla FD-B**

Se localiza en la proyección de los túneles de acceso a Casa de Máquinas y a Galería de Oscilación, su longitud es mayor a los 220 m y su espesor en la zona de cizallamiento es de 40 cm con relleno de roca fracturada.

- **Falla FD-C**

Se localiza en el desplante de la subestación y afectará al piso y ambos taludes de la porción norte sur respectivamente, su longitud es mayor a los 150 m y el espesor de la zona de desplazamiento de 5 a 6 m con relleno de roca fracturada y planos con estrías.

- **Falla FD-L**

Se localiza en las obras de excavación de la subestación y plataforma de transformadores, con longitud de 150 m, el espesor de cizallamiento es de 0.10 m y está rellena de arcilla, roca fracturada y planos con estrías.

- **Falla FD-Q**

Se localiza en la zona por donde pasará el túnel de acceso a Casa de Máquinas, su longitud es de 100 m y espesor de 5 m con relleno de milonita y brecha de falla.

- **Falla Crucero-Lagarto**

La Falla Crucero afecta directamente a las obras subterráneas de Casa de Máquinas y Galería de Oscilación, su longitud es cercana a los 800 m, y tiene una continuidad asociada con la Falla Lagarto. Superficialmente, la traza de la falla se distribuye siguiendo la trayectoria del canal vertedor de la obra de excedencias, el espesor en la zona de cizallamiento es mayor a los 20 m, y presenta un relleno compuesto por roca triturada y arcilla plástica.

Las fallas principales que afectan directamente a la Casa de Máquinas son:

- **Falla F-VI**
- **Falla FD-B**
- **Falla F-IV**
- **Falla FD-Q**
- **Falla Crucero-Lagarto**

## 2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS OBRAS DE GENERACIÓN

La geología estructural de la margen derecha presenta problemas para las excavaciones a cielo abierto, como el canal de llamada de obra de toma, en comparación con la margen izquierda, en donde se presentan mayores espesores de roca descomprimida y además tiene la presencia de material vulcano-sedimentario.

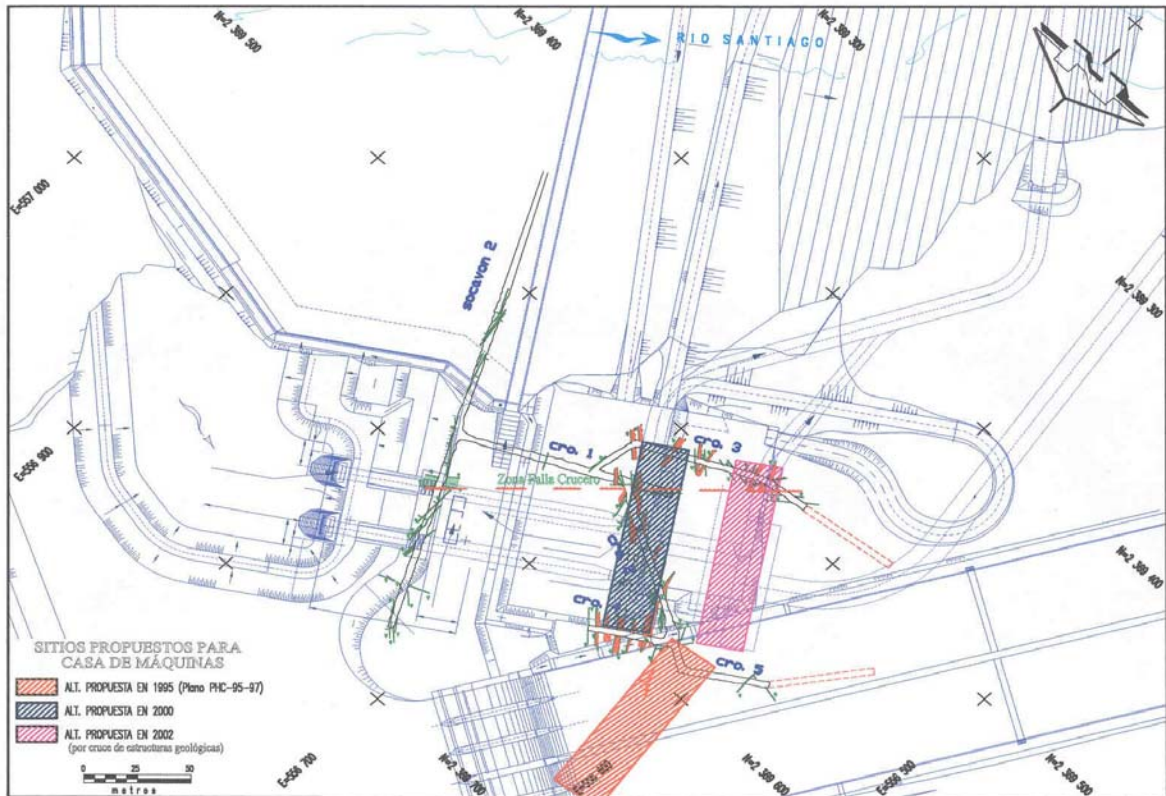


Fig.11 Propuestas de ubicación de la Casa de Máquinas.

Las obras de generación sufrieron un cambio de diseño y de posición en el año 2001 debido a los análisis geológico estructurales realizados (Fig. 10). Su posición final es la margen derecha para lo cual se consideró la reubicación de las estructuras:

- Canal de llamada de la obra de toma.
- Túnel inclinado para la tubería a presión.
- Dos cavernas, una para la Casa de Máquinas y la otra para la Galería de Oscilación, ambas con su eje mayor paralelo al eje de la cortina; la primera se ubicaría a 77.7 m aguas abajo de eje de la cortina, mientras que el eje de la segunda, a 55 m de la Casa de Máquinas.

- Túnel de desfogue de 14 m de diámetro.
- Entre ambas cavernas se excavaría la lumbrera para cables.
- Dos túneles complementarios que servirían de acceso a las obras principales.

Las cavernas de la Casa de Máquinas se desplazaron una distancia de 50 m aguas abajo del proyecto inicial, con el objeto de evitar la incidencia de diques. Aún cuando la obra de generación se localiza en la margen derecha del río Santiago, su acceso es desde la margen izquierda.

En general, la obra de generación está comprendida por: la obra de toma, dos tuberías de presión, Casa de Máquinas, Galería de Oscilación, túnel de desfogue, túneles auxiliares, lumbrera de buses y de ventilación, subestación y plataforma de transformadores; estas últimas en superficie (Fig. 5).

A continuación se describen brevemente las características geológicas de cada una de las obras que componen la obra de generación.

## **2.1 *Obra de toma***

La obra de toma se localiza en la porción oriental de la margen derecha del río Santiago, en forma paralela y a una distancia de 70 m del eje de la cortina, cuenta con una longitud aproximada de 160 m y un ancho que varía de 40 m en la entrada a 70 m en su parte más amplia, en la zona de las bocatomas el ancho es de 56 m con una altura de 74 m y una pendiente de 0.5:1; el talud derecho tiene 45 m de altura hasta una elevación de piso del canal de llamada del vertedor con pendiente 0.5:1, el canal de llamada de la obra de toma en su porción izquierda, se liga con los cortes para el desplante del plinto, casi en la zona de las bocatomas en donde los taludes izquierdos se presenta una pendiente de 0.5:1.

El piso del canal de llamada y los taludes se excavarán en roca de la Ignimbrita El Cajón; la parte del canal más cercana al plinto quedará en rocas de la unidad Tic U2, y más hacia el noroeste tanto el piso como el talud izquierdo permanecerán en rocas de la Unidad TicU3.

## **2.2 *Tuberías de presión***

Formadas por dos túneles de sección circular y 10 m de diámetro a partir del piso de la obra de toma; inician con un tramo inclinado de 65° respecto a la horizontal y una longitud aproximada de 114 m, continúa el tramo horizontal con una longitud de unos 132 m hasta llegar a la Casa de Máquina; ambos túneles quedaran excavados en rocas de regular a buena calidad, duras, compactas y masivas de la Ignimbrita El Cajón.

La porción superior de los túneles en la zona de la bocatoma se alojará en rocas de la Unidad TicU3, y más hacia el fondo, se excavarán en la TicU2 donde inicia el tramo horizontal de los

túneles. La parte superior de los tramos inclinados se presentarán zonas muy fracturadas, debido a la influencia de la falla FMD-14, cuyo echado es casi paralelo a la inclinación de los túneles; también se verá afectado por la presencia de la Falla Crucero. En toda la longitud del tamo inclinado de estos túneles, la pseudoestratificación de la ignimbrita tiene un echado promedio de 22° hacia aguas abajo, por lo que pueden generarse caídos locales en piso o techo de ambos túneles, principalmente al cruce de las fallas.

A partir del codo inferior y en el tramo horizontal de los túneles hasta la llegada de la Casa de Máquinas, se cruzará en forma transversal las fallas F-IV y F-VI (Fig. 9), así como, al menos seis diques diabásicos de menor resistencia que la ignimbrita, los cuales tienen espesores de 1.5 a 2.0 m en promedio y pueden provocar zonas inestables locales.

### **2.3 Casa de Máquinas**

Las cavernas de la Casa de Máquinas y Galería de Oscilación se ubican de forma paralela al eje de la cortina a una distancia aproximada de 50 m aguas abajo del mismo. En este sitio se cruzan varios diques diabásicos de menor resistencia que la ignimbrita, así como la Falla Crucero-Lagarto, que al intersectarse con los diques ocasionó condiciones de inestabilidad en los cruceros exploratorios.

Para esta posición la estabilidad de las excavaciones está condicionada por la Falla Crucero y la zona de diques diabásicos emplazados en fallas preexistentes; debido a la presencia de arcilla montmorillonítica, estos intrusivos tienden a disgregarse y ocasionar socavación cuando se reduce su contenido de agua. Para la Casa de Máquinas y Galería de Oscilación se demostró la formación de bloques potencialmente inestables, tanto en la bóveda como en las paredes mayores de las excavaciones, manifestándose las condiciones desfavorables en la parte sur de la bóveda y en la pared aguas arriba.

Con base en estos resultados se desplazó la Casa de Máquinas 50 m aguas abajo, así se evita la zona de concentración de diques, la obra se alojará en ignimbrita riódacítica, de regular a buena calidad, dura, masiva y poco fracturada y el piso quedará en el aglomerado inferior que se asocia a una roca de buena calidad bien compactada y poco fracturada. Sus dimensiones son de 103.50 m de largo por 22.20 m de ancho y 49.50 m de altura.

En los primeros metros de la esquina SW de la caverna, se infiera la presencia de un dique de composición diabásica de 1.20 m de espesor, en general, está alterado y contiene arcilla de tipo montmorillonítico, que lo hace quebradizo.

El tramo donde se llevará acabo la excavación de la caverna presenta un rango de calidad excelente. La Unidad TicU2 está intrusionada por un dique diabásico, que pasará por la pared aguas abajo de la nueva alternativa de Casa de Máquinas, el espesor de este dique es menor de 0.45 m y su calidad es excelente.

## **2.4 Galería de Oscilación**

La Galería de Oscilación tendrá 66.70 m de largo por 16.00 m de ancho y alcanzará una altura de 52.75 m. La bóveda de la Galería de Oscilación se excavará en rocas de la Ignimbrita El Cajón Unidad TicU3, y el resto de la excavación ocurrirá en la TicU2, aunque en la porción media se cortará al aglomerado superior; en general toda esta zona del macizo rocoso es de buena calidad, bien compacta y poco fracturada. En la bóveda se tendrá la presencia de rocas correspondientes a la Unidad TicU3 de regular a buena calidad, para la TicU2 la roca a excavar variará de buena a excelente.

La Galería de Oscilación presenta mejores condiciones en cuanto al emplazamiento de diques en la zona de excavación. En la esquina SW de la bóveda de esta obra existe la posibilidad de cortar diques durante la excavación, cuyo espesor varía de 0.30 m a 2.40 m y su rango de calidad es de regular a excelente.

Es probable que en la parte media de la excavación se atravesara de manera perpendicular a su eje, una bifurcación de la Falla Crucero-Lagarto con una inclinación promedio de 70°; la zona de falla está representada por una zona densamente fracturada y en tramos cizallada, que ocupa un espesor de 10 m y puede presentar arcilla, por lo que hay que tener vigilancia geológica durante el desarrollo de los trabajos.

## **2.5 Túnel de desfogue**

Se trata de un túnel de sección portal de 14 m de diámetro el cual tiene una dirección S57° W en sus primeros 55 m y a partir de aquí cambia a S10° E hasta el portal de salida. El piso del túnel tiene un desarrollo aproximado de 272.50 m, medidos a partir de la Galería de Oscilación y hasta el corte del talud de empotramiento; las rocas que serán excavadas durante la obra, corresponden a las unidades 2 y 3 de la ignimbrita El Cajón.

El cadenamiento del túnel de desfogue que se está considerando para su descripción, inicia en la salida de la Galería de Oscilación (cad. 0+000), la roca que alojará a la excavación de ésta obra pertenece a la Unidad TicU2, al final de este cadenamiento (cad. 0+083) se deriva una bifurcación de la Falla Crucero-Lagarto, con echado a favor de la excavación y que desplaza abruptamente al aglomerado superior.

En el cadenamiento 0+083 a 0+154 las rocas que se verán involucradas se asocian a la unidad TicU2 en la mayor parte de la excavación de la obra y la TicU3 en la clave. El espesor de cobertura para este tramo variará de 120 a 125 m de roca correspondiente a la Unidad TicU3. El comportamiento de pseudoestratificación se comporta como en el tramo anterior, solo se le suma el fracturamiento asociado a la Unidad TicU3 que se encontrará en el techo, al final de este cadenamiento se encuentra la presencia de la Falla Crucero-Lagarto, la cual desplaza abruptamente a la Unidad TicU2.

En el cadenamamiento 0+154 a 272.50 m se aprecia que el túnel tendrá un espesor de cobertura aproximado a los 100 m y en la zona del portal de salida disminuye a unos 50 m, este intervalo del túnel quedará excavado en rocas de la Unidad El Cajón TicU3 de buena calidad.

En el portal de salida del túnel de desfogue los cortes de los taludes se realizarán con una pendiente de 0.25:1 y una altura aproximada de 25 m, la obra quedará alojada en su totalidad en roca de la Unidad TicU3.

Cabe mencionar que con el desplazamiento de la Casa de Máquinas, el túnel de desfogue inicia y termina en los puntos ya mencionados, solo que se desarrolla una curva al inicio llegando a una longitud total de 310.33 m.

## ***2.6 Subestación y plataforma de transformadores***

Estas obras inician 100 m abajo del eje de la cortina y el área que ocupa mide aproximadamente 160 m de largo por 85 m de ancho y geoméricamente están paralelas al canal vertedor; la plataforma para subestación y transformadores es una sola, el área para los transformadores se ubicará aguas arriba y la subestación hacia aguas abajo.

Los cortes de talud en la plataforma son los que se realizarán al noroeste de esta área y comprenden dos cortes: el superior que tiene 12 m de altura y una pendiente de 0.5:1, mientras que en el inferior tiene una pendiente de 0.25:1 alcanzando una altura de 25 m; la excavación será en la ignimbrita de la Unidad TicU3, en donde se estima que la roca se encuentra muy fracturada; en los taludes noroeste se prevé la aparición de los diques diabásicos completamente alterados, lo que puede provocar inestabilidad al intersecarse con la seudoestratificación, algunos de estos diques también cruzarán en el piso de la plataforma, debido a la alteración que presentan provocarán socavación.

## ***2.7 Lumbrera de buses***

Esta obra inicia en el piso de la plataforma de transformadores, y consiste en una excavación vertical cuya sección circular es de 5 m de diámetro; quedará excavada en rocas de la Unidad ignimbrita El Cajón, la parte superior se alojará en rocas de la Unidad TicU3, la cual tiene un rango de calidad de muy mala a mala, es dura, compacta, masiva y en ocasiones presente una densidad importante de fracturamiento; y más hacia el fondo se excavará en la Unidad TicU2, hasta el tope del túnel donde se atravesará el aglomerado superior que está constituido por líticos que varían de escaso centímetros hasta 20 cm de diámetro, la calidad de la roca se ubica en un rango de regular a excelente, dura, compacta, y de alta resistencia mecánica.

Por el desplazamiento de la Casa de Máquinas, la lumbrera de buses en el tramo horizontal se gira hacia el sur, para que la superficie no quede en el área del vertedor; y aunque se evitará en gran parte el cruce de la zona de diques, los problemas de estabilidad se pueden presentar en los primeros 40 m de profundidad.



### 3 PLANEACIÓN DE EXCAVACIÓN

Como se mencionó en capítulos anteriores, las obras de generación se ubicarán en la margen derecha, en este capítulo, se describirá la planeación de cómo se excavará cada una de las estructuras que conforman las obras de generación

El proceso general para llevar a cabo las excavaciones correspondientes es el siguiente:

- Túnel de acceso a Casa de Máquinas y Galería de Oscilación
- Túnel de desfogue
- Casa de Máquinas
- Túneles de aspiración
- Galería de Oscilación
- Lumbreras y túneles auxiliares
- Tuberías a presión

#### *3.1 Túnel de acceso a Casa de Máquinas y Galería de Oscilación*

A partir de la elevación 245 (Fig. 11) se excavará el túnel de acceso a Casa de Máquinas y Galería de Oscilación. En las zonas donde se requiera estabilizar la excavación será con anclas de fricción de 1 ½" y 6 m de longitud máxima, en el caso de un macizo rocoso muy fracturado se colocarán marcos metálicos.

El revestimiento definitivo será mediante concreto hidráulico reforzado en los sitios donde definitivos. La cimbra será metálica y de madera según lo requiera el tipo de sección que se esté revistiendo, en el caso de las intersecciones de túneles, por ampliación de ancho, se usarán de madera fijadas con andamios para conseguir la geometría indicada.

Una vez que ya no se requieran de estos túneles serán obturados mediante tapones de concreto.

En el portal del túnel de acceso a Casa de Máquinas se construirá una plataforma (elev. 245) donde se colocará parte de las instalaciones provisionales que servirán de apoyo durante las excavaciones.

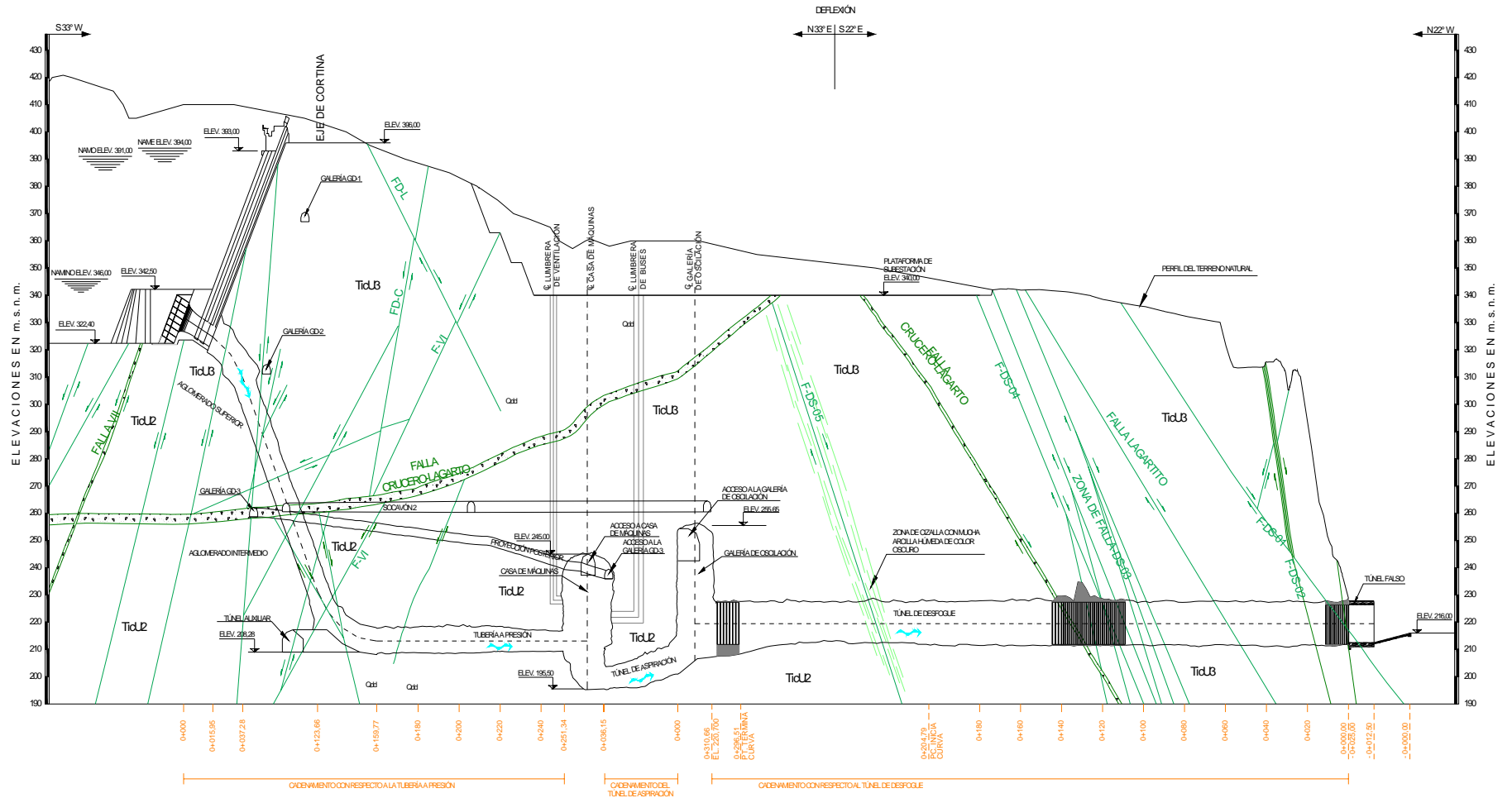


Fig.12 Sección Longitudinal para excavaciones

### **3.2 Túnel de desfogue**

El desfogue tiene prioridad porque desde éste se podrá acceder a los frentes de excavación de obras subterráneas.

Como se mencionó anteriormente es de sección tipo portal de 14 m de diámetro y una longitud de 310.33m hasta llegar a la Galería de Oscilación.

Los servicios de apoyo instalados en el portal de acceso a Casa de Máquinas se compartirán con este frente, instalando las líneas de alimentación hasta el portal de salida del desfogue y conforme se avance en la excavación se llevarán a lo largo de todo el túnel.

La excavación del portal del desfogue comenzará desde la Galería de Oscilación hacia aguas abajo (comenzando en la unidad TicU2 para terminar en la TicU3) será a cielo abierto para llegar al piso, a la elevación 224.00 y desde ésta se hará una rampa hasta la cota 211.80 en el inicio del túnel. Los taludes serán excavados con inclinación 0.25:1

El túnel se excavará en dos etapas primero la media sección superior, una vez concluida se proseguirá con la media sección inferior, hasta comunicarse con la Galería de Oscilación. Las voladuras que se ejecuten serán de tipo controladas y para evitar que se dañen las paredes se hará un postcorte (método de voladura en el cual las perforaciones perimetrales están con separación muy próxima y cargadas ligeramente con explosivos, las cuales son detonadas simultáneamente, pero inmediatamente después de que la masa principal ha sido detonada.) de acuerdo a cada etapa y al tipo de diseño.

Las zonas en las que se necesiten estabilizar la excavación en paredes y bóveda del túnel se considerará el uso de anclas de fricción de 25.4 mm de diámetro, de 4 a 9 m de longitud y anclas de 38.1 mm de diámetro de 6 a 9 m de longitud. En los taludes del portal se colocarán anclas de fricción de 38.1 mm de diámetro de 12 m de longitud. Para estabilizar el macizo rocoso se colocarán marcos metálicos, que serán confinados mediante concreto hidráulico y servirán como soporte permanente.

Se perforarán drenes según el diseño de detalle mediante barrenos de 76.2 mm de diámetro y 6 m de longitud.

La colocación del concreto hidráulico en el túnel de desfogue se hará utilizando una cimbra metálica; en el piso se colará una losa de 70 cm de espesor, fijada al terreno por medio de un anclaje de 25.4 mm de diámetro, de 3.50 m de longitud de roca, esta losa se prolongará hasta en la rampa hacia aguas abajo según el diseño; en los muros se colocará el revestimiento en la media sección inferior y solo en la zona del portal y del enlace con la Galería de Oscilación, se colocará revestimiento en muros y bóveda.

### **3.3 Casa de Máquinas**

A Casa de Máquinas se llegará por tres túneles (Fig. 11), el primero en llegar será un túnel de construcción el cual se comunicará por el tímpano sur y servirá para excavar la bóveda de la caverna, el segundo es por la pared de aguas arriba, que llega a la playa de montaje, en la elevación 224 (este túnel es definitivo), el tercer túnel de construcción llega por el tímpano norte a la elevación 205 y servirá para retirar el material de excavación de los fosos de turbinas y cárcamo de bombeo.

La Casa de Máquinas estará situada en una zona de unión de varias fallas geológicas. Desde la bóveda hasta el vano de llegada de la tubería a presión estará alojada en la unidad TicU2 y el resto en el aglomerado intermedio de esta unidad.

La excavación tendrá una longitud de 103.50 m, un ancho de 22.20 m y una altura de 49.50 m. se iniciará desde el túnel auxiliar de construcción que llegará a la bóveda de la Casa de Máquinas por la pared del tímpano sur a la elevación 236.20.

La bóveda se excavará entre las elevaciones 245.00 y 236.20, en tres sub-etapas. La excavación de cada sub-etapa llevará un defasamiento de por lo menos 10 m., sin embargo, la longitud del avance será definido por las condiciones del macizo rocoso

Una vez concluida la excavación de la bóveda, se iniciará con la caverna en cinco banqueos generales y posteriormente se excavarán los fosos de turbinas

Para todas las etapas de excavación se contará con un cárcamo de bombeo, donde se canalizarán las filtraciones que pudieran presentarse a través del macizo rocoso y también para poder expulsar el agua del proceso de barrenación.

#### ***Primer banqueo***

Localizado entre las elevaciones 236.20 y 230.20. La barrenación será vertical al centro y en la zona cercana a la pared será horizontal para poder dar el acabado solicitado en proyecto, con longitudes de avance en cada ciclo de excavación de 5 metros.

En las paredes se hará precorte en todo el perímetro de la Casa de Máquinas, los tratamientos a la roca serán de acuerdo a las condiciones de la misma.

El material de deshecho se sacará primero por el túnel auxiliar a la bóveda de Casa de Máquinas, posteriormente por el túnel de acceso a Casa de Máquinas el cual ya estará terminado, se contará con una rampa, por donde accederán los equipos y vehículos que sean necesarios en el frente.

### *Segundo banqueo*

Comprendido entre las elevaciones 230.20 y 224.20. El túnel de acceso a la Casa de Máquinas a la elevación 224.20 ya estará comunicado con la caverna, el material producto de la excavación se retirará por túnel.

### *Tercer banqueo*

Situado entre las elevaciones 224.20 y la 218.20, el material será extraído por el túnel de acceso a la Casa de Máquinas en la elevación 224.20, para ellos se construirá una rampa provisional con el material producto de la excavación, para mantener el acceso al túnel.

### *Cuarto banqueo*

Esta etapa comprenderá entre las elevaciones 218.20 y la 212.20. el retiro del material es igual que en el tercer banqueo, la rampa de acceso se extenderá hasta la elevación 212.20.

### *Quinto banqueo*

El último de los banqueos se localizará entre las elevaciones 212.20 y 206.20. El material se sacará por el túnel auxiliar de construcción que para esta etapa ya estará concluido y comunicado con la Casa de Máquinas a la elevación 205.50 por el tímpano norte de ésta.

Para llegar al piso de los fosos de turbinas, se hará un ajuste de 70 cm según sea el caso y de ahí se iniciará la excavación de los fosos, del cárcamo de bombeo y de la galería de drenaje.

## **3.3.1 Fosos de turbinas**

Se excavarán desde la elevación 205.50, incluye barrenaciones de precorte en todo el perímetro de los fosos además de la barrenación para la excavación, para lo cual será necesario tener ya excavados los túneles de aspiración por donde saldrá el material producto de las voladuras. Conforme se vayan excavando los fosos se harán los tratamientos de roca.

## **3.3.2 Cárcamo de bombeo y galería de drenaje**

En forma simultánea a la excavación de los fosos de turbinas, se trabajará en la excavación del cárcamo de bombeo y galería de drenaje, hasta sus cotas de proyecto. La simultaneidad es debida a la comunicación que existe entre ellas.

Al igual que en los fosos, se precortará todo el perímetro de estas estructuras y el tratamiento de la roca se hará conforme se vaya excavando.

Tanto el material de los fosos, como el de cárcamo de bombeo y Galería de Oscilación se sacarán por los túneles de aspiración los cuales ya estarán comunicados a la Galería de Oscilación y al túnel de desfogue.

Se considera para el tratamiento en la Casa de Máquinas habilitar drenes y anclas de tensión en la bóveda y en las paredes, de 12, 15 y 18 metros de longitud y tensadas a 3.8 toneladas.

Las anclas de tensión deben tener las siguientes características:

Anclas de 38.1 mm de diámetro, de 3, 6 y 9 m de longitud en la bóveda, y en las paredes de 12, 15 y 18 metros de longitud y tensadas a 3.8 toneladas. Anclas de 25.4 mm de diámetro, de 3, 6, 9 y 15 metros de longitud en las paredes y tensadas a 1.7 toneladas.

Las anclas tendrán una placa metálica de apoyo y la fijación se logrará en barreno mediante una combinación de cartuchos de cemento de fraguado rápido y lento.

En la bóveda se colocará refuerzo mediante concreto lanzado y malla electro-soldada. Previo al colado de los muros y la losa de piso, se harán restituciones de piso en caso que sea necesario por sobre excavación; inmediatamente después se colará el concreto hidráulico iniciando los primeros colados de los fosos de turbinas.

Los primeros colados se harán en la losa de piso en la elevación 195.50 seguido de 3 colados en los muros de la carCasa depara alcanzar la elevación 205.50. en esta misma fase se colarán los elementos de apoyo para el tubo de aspiración, con la sección indicada en la los planos autorizados para construcción.

Una vez terminados estos muros, en forma coordinada se harán los colados en función al avance de la conformación de la carCasa de, por lo que se irán empacando las piezas metálicas.

En principio se ha considerado que se harán seis colados desde el piso para alcanzar el piso del generador. Estos colados son del tipo masivo. Se utilizará bomba para el vaciado del concreto. El resto de los elementos estructurales serán colados mediante cimbra trepante para el caso de los muros y para las losas de los entrepisos se usará cimbra común que será colada mediante andamios.

Al término de los colados de pisos y muros, en paralelo se procederá a la construcción de la obra civil correspondiente a la habilitación de líneas de servicios, sanitarios y acabados

### **3.4 Túneles de aspiración**

Estos túneles se excavarán en una zona exenta de fallas geológicas.

Serán dos excavaciones de sección rectangular variable de 18.60 x 11.22 m y una longitud cerca de 40 m., las cuales iniciarán una vez que terminen las excavaciones del túnel de desfogue y del túnel de construcción a la Galería de Oscilación a la elevación 203.00.

Para el acceso a los túneles de aspiración y a los fosos de turbinas en Casa de Máquinas, antes de que termine la excavación de la Galería de Oscilación se desprenderá una galería provisional.

Inicialmente se excavarán a sección reducida para lograr el acceso citado y al terminar la excavación de la Galería de Oscilación, se excavarán hasta llegar a sus dimensiones proyectadas.

### ***3.5 Galería de Oscilación***

La Galería se excavará desde la bóveda hasta prácticamente el tercio inferior en roca de la unidad TicU2, el resto estará en el aglomerado intermedio de esta unidad. No se tienen identificadas la presencia de fallas geológicas.

La Galería de Oscilación tendrá una longitud de 66.70 m, un ancho de 16 m y una altura de 52.75 m. Contará con un acceso que inicialmente llegará a la elevación 247.50 y en la excavación del primer banqueo a la elevación 243.00 que será el definitivo.

Los servicios de apoyo (energía, agua técnica, etc) se suministrarán continuando con las líneas provenientes desde la superficie alimentando a los túneles de acceso y Casa de Máquinas haciendo las adecuaciones necesarias.

La bóveda está comprendida entre las elevaciones 255.50 y 247.50, se excavará por el método de barrenación y voladura, se hará en dos etapas con un defasamiento de 10 m. Se perforan barrenos para drenaje de 76.2 mm de diámetro de 3 metros de longitud.

El material producto de la excavación será retirado con un cargador frontal sobre neumáticos y camiones fuera de carretera.

#### ***Primer banqueo***

Comprendido entre las elevaciones 247.50 y 241.50. En esta etapa el acceso será por el túnel de acceso a la Galería de Oscilación. Se excavarán cada 5 metros de longitud, la altura del banco para este caso será de 7 m.

#### ***Segundo banqueo***

Se localizará entre las elevaciones 241 y 235.50. Se utilizará el túnel de acceso a la Galería de Oscilación y por medio de una rampa se accederá a esta etapa, el avance será de 5 metros de longitud.

***Tercer banqueo***

Estará comprendido entre las elevaciones 235.50 y 229.50 inicialmente se hará una lumbrera que comunique el banqueo con el túnel y ésta se ampliará hasta tener un acceso franco al banqueo., el material será retirado por el túnel de desfogue.

***Cuarto banqueo***

Comprenderá entre las elevaciones 229.50 y 223.50 el proceso será el mismo que en los banqueos anteriores, la rezaga se extraerá por el túnel de desfogue.

***Quinto banqueo***

Estará comprendido entre las elevaciones 223.50 y 217.50 el proceso será el mismo que en los banqueos anteriores, la rezaga se extraerá por el túnel de desfogue.

***Sexto banqueo***

Comprenderá entre las elevaciones 217.50 y 211.80 el proceso será el mismo que en los banqueos anteriores, la rezaga se extraerá por el túnel de desfogue.

Los túneles de aspiración se soportarán con anclas de fricción de 38.1 mm de diámetro, de 6 a 9 m de longitud, se colocará concreto lanzado de fibra metálica en el espesor que sea indicado en el diseño de detalle y drenes conforme a los planos del proyecto.

En la Galería de Oscilación se colocarán anclaje de tensión, anclas de 38.1 mm de diámetro de 6 y 9 m de longitud en la bóveda y en las paredes, con tensión de 3.8 toneladas, en las paredes además incluyen anclas de 12, 15 y 18 m de longitud. Se usarán también anclas de 25.4 mm de diámetro de 3, 6 y 9 m de longitud en las paredes, con una tensión de 1.7 toneladas.

Las anclas tendrán una placa metálica de apoyo y la fijación del ancla se logrará en el barreno mediante una combinación de cartuchos de cemento de fraguado rápido y lento. Se colocará refuerzo mediante concreto lanzado con malla o fibra metálica según lo establezca el diseño de detalle.

Terminada la excavación se colará el piso, que está asociado a la continuidad de la rampa de los túneles de aspiración, el proceso será convencional colocando el concreto mediante bomba para concreto y tubería. Los muros se colarán utilizando cimbra deslizante, lo mismo que los elementos estructurales en los cuales se alojarán y operarán compuertas con remate en la elevación 343.00

En los túneles de aspiración se harán inyecciones de contacto concreto-roca en la bóveda con barrenos de 2 metros de longitud máxima.



### **3.5.1 Trabe de compuertas**

En la elevación 343.00 se deberá alojar el piso de maniobras, el cual estará formado por losa-acero con apoyo en los pilares de las compuertas y en los muros en forma perimetral.

Para la operación de las compuertas se construirá una trabe carril, cuyos apoyos del riel estarán dados por columnas en el lado aguas abajo mediante ménsulas fijas en el muro de la pared aguas arriba.

## **3.6 Lumbreras y túneles auxiliares**

Se deberán construir túneles y lumbreras que se conectarán con la Casa de Máquinas como son:

- Lumbreras de buses
- Lumbreras de cables
- Lumbreras de ventilación

### **3.6.1 Lumbrera de buses**

Las lumbreras de buses tendrán una sección de excavación de 5.80 metros de diámetro y una longitud de proyecto de 120 metros. Se excavarán en dos etapas, en la primera se utilizará una contrapocera de 2.40 metros de diámetro y la segunda se hará utilizando el método de banqueo de barrenación-voladura.

Para iniciar la excavación utilizando la contrapocera será necesario que en superficie la zona de subestación eléctrica se encuentre a nivel de piso, en la cota 340.00, puesto que ahí se colocará el equipo de perforación. Y segundo que el túnel 2 de aspiración esté excavado ya que por ahí saldrá el barreno piloto de la lumbrera de buses No. 2 para después colocar la rima e iniciar la excavación ascendente hasta llegar a la superficie.

Para excavar la lumbrera No. 1 se construirá un túnel piloto a la elevación 224.40 el cual se comunicará por la Casa de Máquinas a la lumbrera y de ahí se hará el rimado hasta la superficie y posteriormente se hará la ampliación con voladuras convencionales. El soporte de estas lumbreras será mediante anclaje de 25.4 mm de diámetro de 2.50 m de longitud, concreto lanzado y drenes cortos.

En la zona de la subestación se deberá contar con energía eléctrica, un depósito para agua con la cual se alimentará a la contrapocera durante la excavación, un taller y una oficina de campo.

Los trabajos en la segunda etapa inician con la excavación para alojar un brocal de concreto hidráulico el cual servirá para evitar que el material se desborde hacia la lumbrera durante el proceso de excavación. Terminado el brocal se continuará con la excavación siguiendo el ciclo de excavación: trazo topográfico, barrenación en el frente, carga, voladura, ventilación, amacice, levantamiento geológico y colocación de tratamiento de soporte.

### ***3.6.2 Lumbreras de cables***

La lumbrera de cables tendrá un diámetro de excavación de 3.10 metros y para su excavación será necesario tener liberada la zona de la subestación y la Casa de Máquinas a la elevación 224.20 ya que ahí se alojará el barreno piloto, para ello se construirá una galería piloto la cual servirá también para la excavación de la lumbrera de buses No. 1. La excavación será en una sola etapa.

### ***3.6.3 Lumbreras de ventilación***

Las lumbreras de ventilación al igual que las de buses, se excavarán utilizando una contrapocera pero con la diferencia que éstas se harán en una sola etapa, ya que la sección de excavación es de 3.10 metros y está en rango de operación de equipo.

Para la excavación se necesita que esté liberada en el exterior la zona de la subestación a la elevación 340.00 y que en Casa de Máquinas se hayan excavado las tuberías de presión que es por donde se recibirá el barreno piloto para las lumbreras de ventilación No. 2 y 3. Para recibir la No. 1 se necesitará construir una galería piloto a la elevación 224.20 y ahí se recibirá el barreno piloto para iniciar el rimado de la lumbrera.

Para el soporte se colocarán anclas de 25.4 mm de diámetro de 2.0 metros de longitud, concreto lanzado y drenes cortos.

## ***3.7 Tuberías a presión***

Las tuberías a presión tendrán una sección circular de excavación de 9.60 m de diámetro y una longitud de 114 m en la rama inclinada y 132 m en la horizontal.

Las tuberías estarán alojadas en la unidad TicU3 a partir del portal de la Obra de toma y hasta prácticamente la mitad del recorrido de la rama inclinada, sitio en el cual se cruzará la Falla Crucero y un estrato de aglomerado que sobreyace a la unidad TicU2, en la cual se excavará el resto de la rama inclinada. En la zona del codo de transición al tramo horizontal se cruzarán dos fallas del sistema F-VI.

En el tramo horizontal de las tuberías a presión estará alojado en la unidad TicU2 en un 40% de la longitud a partir del codo y en el resto es muy probable que se desarrolle la excavación en un estrato de aglomerado intermedio en la unidad TicU2. La transición entre materiales está limitado por la Falla F-IV.

Los túneles se atacarán por dos frentes, uno será la rama inclinada desde el bocatoma, o por una galería auxiliar que llegará a la elevación 310.00 sobre el eje de las tuberías, para ahí colocar la contrapocera e iniciar su rimado, y el segundo por el túnel auxiliar que llegará al codo de la tubería en donde inicia el tramo horizontal.

Desde la bocatoma se preparará una plataforma en la zona de la transición de sección cuadrada a circular. Esta transición permite por su geometría, habilitar una zona de maniobras para proceder a la excavación de un primer túnel inclinado mediante contrapocera y posteriormente ampliar dicho túnel hasta la sección circular requerida.

Una vez instalada la contrapocera, se perforará el barreno piloto de 30.48 cm de diámetro hasta la zona de los túneles en el codo e inicio del tramo horizontal, donde se le colocará la rima de 2.40 metros de diámetro y con ésta se avanzará hasta la plataforma en la transición.

A la elevación 310.00 utilizando la Galería auxiliar el proceso será el siguiente: terminada la galería hasta los ejes de las tuberías se colocará el equipo en el sitio desde donde se perforará el barreno piloto que llegará a la parte inferior de las tuberías y posteriormente se coloca la rima que hará el rimado hasta la elevación de la galería. Terminada la excavación con la contrapocera se retirará el equipo para dar continuidad a la ampliación de la rama inclinada a su sección definitiva. El material de las voladuras caerá hasta los túneles de presión y de ahí se llevará a los sitios de acopio o colocación en la cortina.

Se tiene considerado estabilizar la excavación con anclas de tensión de 25.4 mm de diámetro de 3 a 9 metros de longitud, tensadas a 2 toneladas, para lo cual se colocará una placa metálica de apoyo y se fijará será en barreno mediante una combinación de cartuchos de cemento de fraguado rápido y lento. También se colocarán anclas con características similares de 38.1 mm de diámetro y tensadas a 4 toneladas.

En ambos tramos se colocará los anillos de blindaje, soportados mediante calzas para mantenerlos en su debida posición. Se colocarán anillos para conformar tramos de 12 m de longitud máxima y una vez en su sitio se colará el concreto entre la roca o soporte provisional y el blindaje.

Los colados de empaque de la tubería a presión se harán en dos tramos. El primero corresponde a la parte horizontal en el cual el acceso y suministro de los anillos del blindaje, así como del concreto, se harán por el túnel de acceso que llega a la zona del codo inferior de

la tubería a presión. El segundo tramo corresponde a la rama inclinada en cuyo caso el acceso y suministro se hará desde la bocatoma.

En zonas donde crucen diques o fallas, si el proyecto lo indica se colocará concreto reforzado en cuyo caso previo a la presentación de las piezas de los anillos, se fijaría el acero de refuerzo.

El codo superior es un arco de círculo de  $38.435^\circ$ , con radio de 31.80 y longitud de 21.33 m en el eje de la tubería. El inicio del codo es de sección rectangular de 10.04 m por 11.75 m para la excavación y de 6.244 m de base por 7.25 m de altura de sección terminada; termina en una sección circular de 9.55 m de diámetro de excavación y 7.95 m de diámetro interior. La elevación del eje de la tubería en el inicio del codo es 324.709 y al final del codo es de 309.713.

La rama inclinada consta de  $65^\circ$  con respecto a la horizontal y tiene una longitud de 86.380 m y la sección se mantiene en un diámetro interior de 7.95 m. La elevación superior del eje de 309.713 e inferior de 231.489. Antes de la excavación de cada rama inclinada se coloca un anclaje perimetral con el objeto de asegurar la boquilla de empotramiento de cada una y evitar desprendimientos de bloques durante el inicio de excavación del codo superior de cada rama inclinada. La excavación se ha programado mediante el método de perforación y voladura, con longitud de avance por ciclo de 1 a 3 m. Se anticipa problemas de soporte natural, la cual requiere soporte temporal, por lo que el proyecto contempla anclaje y concreto lanzado.

El codo inferior es un arco de círculo de  $65^\circ$  con radio de 31.80 m y longitud de 36.114 m medida en el eje de la tubería. La elevación del eje en la parte final del codo cruza con el eje de distribuidor en la elevación 213.060.

La rama horizontal esta formada por dos secciones: la primera de 60.85 m de longitud con diámetro interior de 7.95 m y a continuación la sección circular se reduce gradualmente en una longitud de 28.06 m a 5.50 m de diámetro interior y 7.10 m de excavación, con el eje en la elevación 213.060, continua con una longitud de 2.70 m hasta el paramento oriente de la Casa de Máquinas.

**Nota:**

Si durante la excavación se presentara algún caído de algún bloque, se retirará dicho material y se procederá a restituir la geometría de la excavación conforme al proyecto mediante concreto lanzado o hidráulico, dependiendo de la magnitud del caído.

## 4 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA CASA DE MÁQUINAS Y DE LA GALERÍA DE OSCILACIÓN

Con objeto de verificar que el comportamiento de una estructura, con lo estimado en el diseño, es necesario instalar durante la construcción una serie de aparatos de medición en puntos específicos que en conjunto se denominan como instrumentación, los cuales, deben ser monitoreados periódicamente a fin de analizar el comportamiento y con base en ellas evaluar en todo momento las condiciones de seguridad de las estructuras, sobre todo observar la tendencia de las variables que pueden indicar un comportamiento anormal y peligroso o bien indicar las medidas necesarias que permitan garantizar la estabilidad de la estructura. En otras palabras la instrumentación tiene como objetivo conocer el comportamiento de las estructuras desde la etapa de construcción hasta el término de su vida útil.

En el caso de presas de enrocamiento con cara de concreto, los principales factores que influyen en su comportamiento son los siguientes:

Riesgos geológicos, estabilidad de laderas y movimientos de bloques de roca.

Las filtraciones y niveles de agua en la cimentación, laderas y en el terraplén.

Los movimientos de las juntas de las losas de la cara de concreto.

El agrietamiento de las losas de la cara de concreto.

La ocurrencia de sismos moderados y fuertes.

Las estructuras geológicas en la cimentación de la cortina, a diferencia de Casa de Máquinas no representarán un riesgo para la seguridad de la presa, después de que se realicen los tratamientos de estabilización, impermeabilización o mejoramiento de roca, por lo que se considera suficiente instalar una red de piezómetros y vertedores de aforo en las galerías de tratamientos, para anticipar y corregir cualquier anomalía que podría presentarse a través de alguna estructura geológica localizadas en la zona como lo son las Fallas, lagarto, crucero, Playón, U4 etc. en los contactos entre unidades y el aglomerado intermedio de la unidad U2 en Casa de Máquinas.

### 4.1 Sistema de Auscultación

La planeación de un sistema de auscultación se inicia con la definición de los objetivos por los cuales se van a instalar los instrumentos y concluye con la información adquirida, el especialista en geotecnia tiene la responsabilidad de establecer dichos objetivos, mientras que el especialista en instrumentación le corresponde la planeación y la ejecución del proyecto.

El sistema de auscultación para el comportamiento de una presa tiene el objetivo estudiar y resolver problemas específicos que se presentan durante la construcción y el servicio de la presa. Con las mediciones obtenidas sobre el comportamiento, en condiciones normales, son válidas para trabajar en un análisis donde se verifique los parámetros y avances en la predicción de dicho comportamiento.

Después de que ha concluido la construcción y ha pasado un tiempo razonable posterior al primer llenado del embalse, las observaciones y los análisis indican que todo marcha bien, entonces la instrumentación instalada demuestra ser útil; pero si algo no marcha adecuadamente, entonces la instrumentación demuestra que es igual o más importante por la oportunidad que ofrece para solucionar el problema en la estructura.

Si las mediciones tienen por finalidad detectar o predecir un daño o falla de la estructura, los instrumentos que se instalen para este fin, deben localizarse con suficiente detalle para descubrir los problemas que pudieran presentarse durante la construcción y operación de la presa y los sitios que deberán elegirse para el estudio son los que harán posible dar una solución rápida y oportuna si llegase a presentarse un problema o se observe una tendencia desfavorable que puede conducir a una situación crítica.

El sistema de auscultación propuesto para las estructuras civiles del P. H. El Cajón, es parcialmente automatizado; los que permitirán obtener información de parámetros y zonas seleccionados con mayor oportunidad posible, reduciendo tiempos de lectura y proceso de datos, disminuyendo costos asociados, reduciendo errores de medición, incrementando la confiabilidad de la información. La instrumentación no automatizada obligará a realizar recorridos en sitios específicos de la obra para complementar la información con mediciones manuales y con inspecciones frecuentes.

#### ***4.1.1 Características generales de la instrumentación***

Como se mencionó anteriormente, la instrumentación tiene como objetivo conocer el funcionamiento de las estructuras, desde la etapa de diseño y construcción, para detectar oportunamente cualquier anomalía que se presente durante y posterior a la construcción.

Este conocimiento permite evaluar en todo momento las condiciones de seguridad de las estructuras, sobretodo, observar la tendencia de las variables que pueden indicar un comportamiento anormal y peligroso.

A continuación se describen de manera general, dependiendo del tipo de estructura, quién determinará que instrumentos se emplearán, en el sistema de auscultación del Proyecto Hidroeléctrico P. H. El Cajón.

### *Inclinómetros verticales*

Los inclinómetros verticales miden los desplazamientos horizontales y asentamientos en el terraplén de la cortina, de manera continua a lo largo del ademe. Está contemplado instalar 6 aparatos, dos en cada una de las secciones transversales correspondientes a las losas ubicadas en la corona, ligeramente defasados del eje de la cortina, y en el respaldo de aguas abajo, en el eje de cadenamiento 0+400.

### *Referencias topográficas, bancos de nivel y bases de centrado*

En el talud aguas abajo se instalaron tres líneas de referencias topográficas longitudinales y una transversal; aguas arriba. Se distribuyeron en tres líneas longitudinales horizontales a las elevaciones 270, 330, 390. También se instalarán dos líneas de referencias topográficas en los muros de aguas arriba y aguas abajo coincidiendo con el centro de cada losa.

En total se prevé instalaron 344 referencias topográficas, y en las laderas 17 bancos de nivel y 16 bases de centrado para el taquímetro. El control se lleva con estación total y nivelación de precisión.

### *Grupos de celdas de presión y extensómetros de placa*

Para determinar la deformabilidad del material 3B se instalaron dos grupos de aparatos con seis celdas de presión y seis extensómetros de placa cada uno. Los grupos se localizarán a la elevación 245, el primero aproximadamente en el cadenamiento 0-076 y el segundo en el cadenamiento 0-020 cerca del eje de la presa.

### *Piezómetros*

Se instalaron 9 piezómetros eléctricos al nivel del desplante para el terraplén, dispuestos cerca de la junta perimetral de la cara de concreto y de las principales discontinuidades geológicas en el respaldo de aguas arriba y así poder conocer el nivel y distribución del nivel de agua en la cimentación cuerpo de la presa.

Siete están localizados a la altura de la junta perimetral atrás del material 2. En las galerías se instalaron 35 piezómetros en la margen derecha y 20 en la margen izquierda principalmente en las discontinuidades que afectan al macizo rocoso.

### *Inclinómetros en la cara de concreto*

Se instalaron tres inclinómetros inclinados para conocer la deformación de la geometría entre la sección máxima y las laderas para tener una visión mas completa del comportamiento de la cara de concreto.

### *Dispositivos de aforo*

Se instaló un dispositivo de aforo automatizado en el caudal que cruza la cara de concreto y la pantalla impermeable debajo de la plantilla de la galería. También a la salida de cada una de las galerías de tratamiento de las laderas previstas y aproximadamente nueve dispositivos de aforo manuales en los ramales principales dentro de las galerías.

### *Acelerógrafos*

Cuatro instrumentos se instalaron a nivel corona: uno en la margen izquierda, dos cerca de los empotramientos de ambas márgenes y otro en el centro de la corona. El quinto acelerógrafo se localiza en el desplante aguas debajo de la cortina, cerca de la entrada del túnel de acceso a Casa de Máquinas.

### *Estación climatológica*

Se instalará una estación climatológica automatizada para conocer los valores de la precipitación pluvial y temperaturas del aire.

### *Medidores de niveles de agua*

Se instalarán dos dispositivos automatizados de nivel que estarán respaldados por escalas de medición manual para conocer los niveles del embalse y del desfogue.

### *Dispositivos automatizados*

Para el P. H. El Cajón se ha diseñado un esquema con cuatro centrales inteligentes, las centrales estarán interconectadas entre sí y a una computadora en la oficina de instrumentación, ubicada en la zona de la subestación en la margen derecha, donde se controlará el proceso. Desde el exterior se podrá acceder a la computadora y al sistema de auscultación mediante un módem y una línea de datos proporcionada por vía telefónica, por radio o vía satelital. Los acelerógrafos estarán interconectados y proporcionarán una señal para iniciar la secuencia de medición de los instrumentos automatizados. Las centrales se ubicaran en las casetas de instrumentación que están en los empotramientos al nivel de la corona, en el talud aguas abajo al centro de la cortina a la elevación 361 y al pie de la cortina en el talud de aguas abajo a la elevación 245.

### *Casetas de instrumentación*

Se requieren de quince casetas de instrumentación, de diversas dimensiones y geometría dependiendo del tipo y cantidad de instrumentos o estaciones de medición que se alojarán y requerirá de una oficina de instrumentación dentro de las instalaciones de la central hidroeléctrica en la zona de la subestación.



### ***Extensómetros tridimensionales***

Se instalarán once extensómetros tridimensionales a lo largo del desarrollo de la junta perimetral, para el seguimiento de los movimientos que presentará dicha junta.

### ***Extensómetros bidimensionales***

Se instalarán trece extensómetros bidimensionales en la junta losas-parapeto, para medir aberturas y asentamientos.

### ***Extensómetros unidimensionales***

En las juntas verticales de la cara de concreto, los movimientos mayores de abertura se esperan en las losas ubicadas en la proximidad de las laderas, disminuyendo a medida que se aproximen al centro del valle, para este caso se instalaron nueve extensómetros.

### ***Extensómetros de barra***

En Casa de Máquinas, se colocaron 9 extensómetros de barra con registro para 3, 9 y 18 m de profundidad, en la pared de aguas arriba. En la pared aguas abajo serán 15 con lecturas para 3, 6, 14, 28 m de profundidad y en la bóveda se colocaron 11 con registros a 3, 6 y 12 m de profundidad.

En la pared aguas abajo de la Galería de Oscilación se colocaron 6 extensómetros de barra, con registro para 3, 9 y 18 m de profundidad. En la pared aguas arriba se colocaron 3, registro para 3, 9 y 18 m de profundidad. En la bóveda se colocarán 6 extensómetros con registro a 3, 6 y 12 metros de profundidad.

En cada túnel de aspiración instalaron dos extensómetros de tres barras de 6, 9, y 15 m de longitud.

Conforme se avance en el proceso de excavación se colocarán los extensómetros y se habilitarán escaleras marinas y pasarelas para que el personal de instrumentación tenga acceso a los cabezales de estos instrumentos.

## ***4.1.2 Instrumentación instalada en Casa de Máquinas y Galería de Oscilación***

Se menciona la localización, el total y nomenclatura para cada uno de los instrumentos instalados en Casa de Máquinas y Galería de Oscilación.

#### 4.1.2.1 Casa de Máquinas

La Casa de Máquinas se instrumentó con el objetivo de verificar la estabilidad de la excavación subterránea (Fig.. 12).

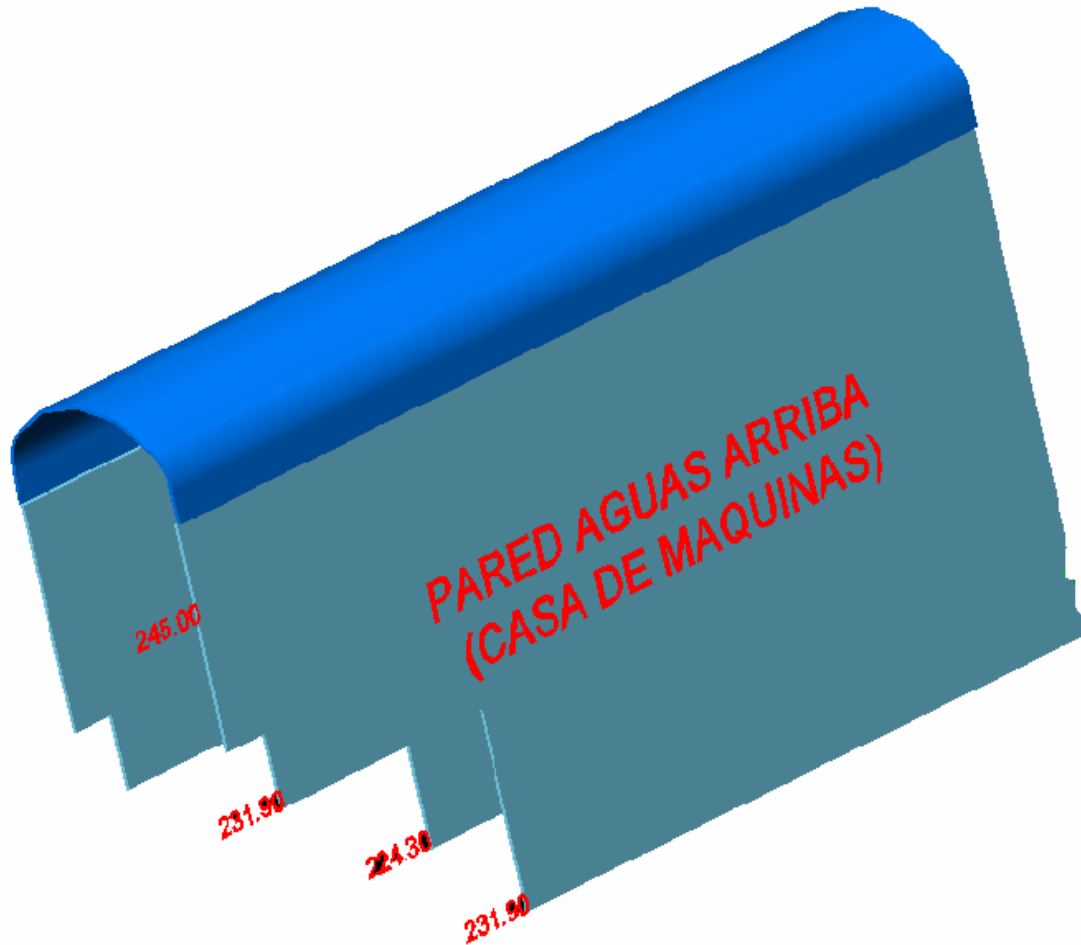


Fig.13 Esquema general de Casa de Máquinas

La bóveda fue instrumentada con once extensómetros de tres barras, ocho con barras de 3, 9, 12 m de longitud, y tres barras con barras de 3, 9, y 15 m. Desde el cadenamiento 0+005 hasta el cadenamiento 0+095 (Fig.. 13).

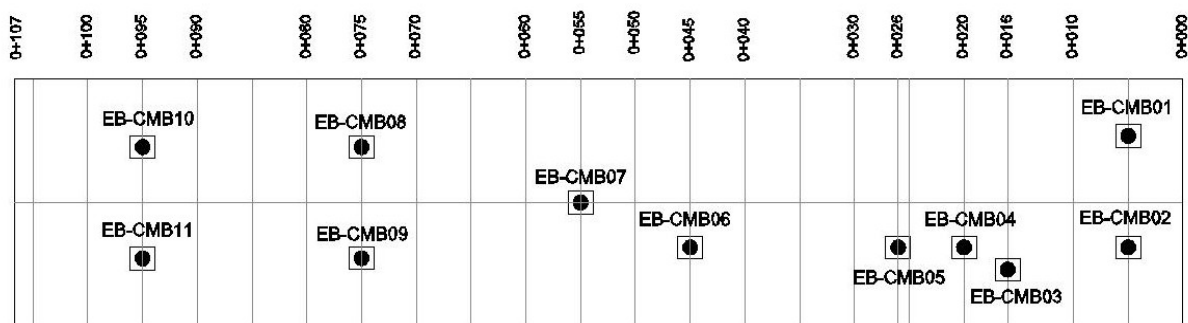


Fig.14 Localización de los Extensómetros de barra en la Bóveda en Casa de Máquinas

La nomenclatura utilizada significa Extensómetro de Barra en Casa de Máquinas en la Bóveda donde la numeración es consecutiva, EB-CMB01....11.

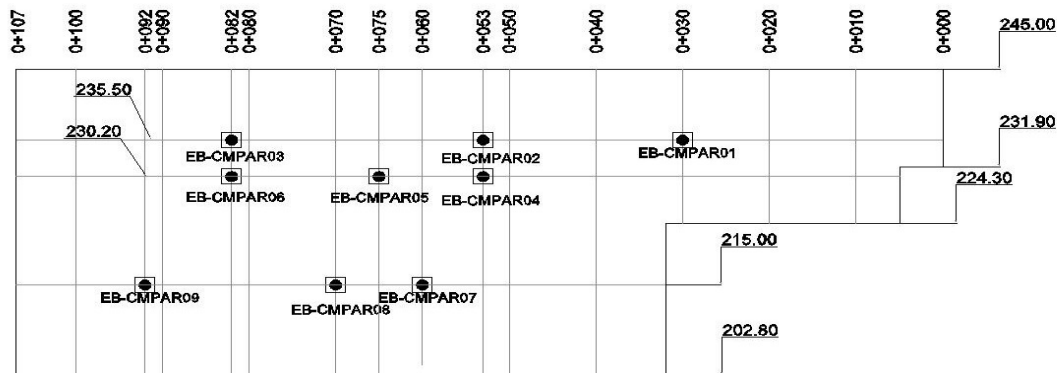
La tabla 1 nos muestra las fechas de instalación y lectura inicial de cada uno de los extensómetros así como la longitud real de cada una de las barras en la bóveda de Casa de Máquinas.

No. extensómetro	Fecha de instalación	Fecha de lectura inicial	Cadenamiento	Longitud de las barras (m)		
				Barra 1	Barra 2	Barra 3
EB-CMB01	29-07-04	31-07-04	0+005	3.48	9.10	15.64
EB-CMB02	28-08-04	29-07-04	0+005	3.00	9.00	12.00
EB-CMB03	17-07-04	19-07-04	0+016	3.00	9.00	12.00
EB-CMB04	21-07-04	22-07-04	0+020	3.00	9.00	15.00
EB-CMB05	09-07-04	12-07-04	0+026	3.46	9.57	12.62
EB-CMB06	22-07-04	23-07-04	0+045	3.00	9.00	15.00
EB-CMB07	26-07-04	31-07-04	0+055	3.25	9.38	12.27
EB-CMB08	26-07-04	31-07-04	0+075	3.36	9.43	12.19
EB-CMB09	20-07-04	20-08-04	0+075	3.00	9.00	12.00
EB-CMB10	20-07-04	23-07-04	0+095	3.00	9.00	12.00
EB-CMB11	20-07-04	27-07-04	0+095	3.18	9.34	12.37

Tabla 1. Casa de Máquinas bóveda extensómetros EB-CMB

En la pared aguas arriba se instalaron nueve extensómetros con tres barras de 3, 9 y 18 m cada uno. Desde el cadenamamiento 0+030 hasta el cadenamamiento 0+092 (Fig.. 14).

La nomenclatura utilizada significa Extensómetro de Barra en Casa de Máquinas Pared Aguas arriba con numeración consecutiva EB-CMPAR01...09.



**Fig.15 Localización de los Extensómetros de barra en la pared aguas arriba en Casa de Máquinas**

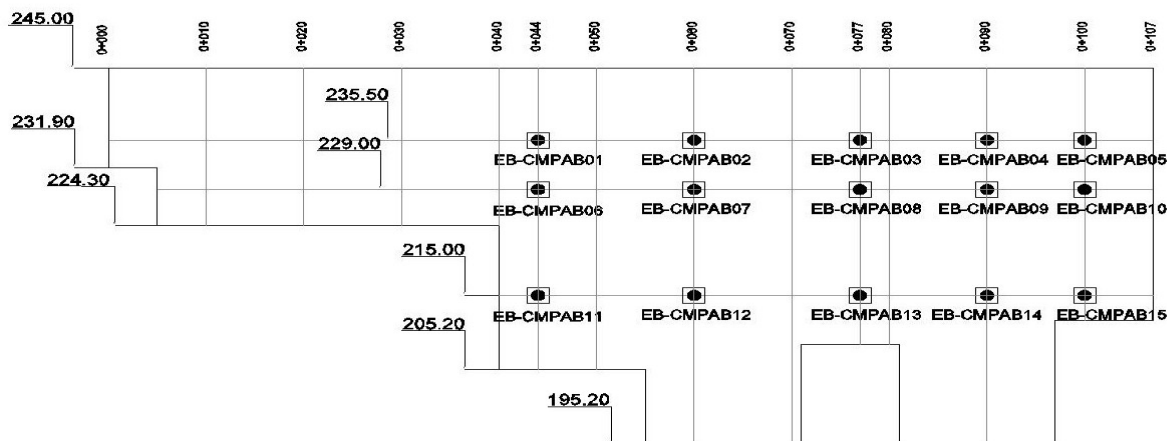
La tabla 2 nos muestra las fechas de instalación y lectura inicial de cada uno de los extensómetros con la longitud real de las barras en la pared aguas arriba de Casa de Máquinas.

No. extensómetro	Fecha de instalación	Fecha de lectura inicial	Cadenamiento	Longitud de las barras (m)		
				Barra 1	Barra 2	Barra 3
EB-CMPAR01	30-09-04	04-10-04	0+030	3.47	9.33	18.23
EB-CMPAR02	30-09-04	04-10-04	0+053	3.12	9.16	18.03
EB-CMPAR03	30-09-04	04-10-04	0+082	3.28	9.36	18.03
EB-CMPAR04	22-10-04	25-10-04	0+053	3.00	9.00	18.00
EB-CMPAR05	22-10-04	25-10-04	0+075	3.00	9.00	18.00
EB-CMPAR06	20-10-04	21-10-04	0+082	3.00	9.00	18.00
EB-CMPAR07	18-12-04	20-12-04	0+060	3.00	9.00	18.00
EB-CMPAR08	18-12-04	20-12-04	0+070	3.33	9.03	18.11
EB-CMPAR09	20-12-04	23-12-04	0+092	3.23	9.27	18.37

**Tabla 2. Casa de Máquinas pared aguas arriba extensómetros EB-CMPAR**

La pared aguas abajo divide la Casa de Máquinas de la Galería de Oscilación, cuenta con quince instrumentos divididos en tres grupos del cadenasamiento 0+044 al cadenasamiento 0+100 (Fig.. 15).

El primer grupo va de EB-CMPAB01 al EB-CMAB05 con barras de 3, 6, 14 y 28 m. El segundo grupo desde EB-CMAB06 al EB-CMAB10 con barras de 3, 6, 14 y 28 m. El tercer grupo de EB-CMAB11 al EB-CMAB15 con barras de 3, 9, 15 y 21 m.



**Fig.16 Localización de los Extensómetros de barra en la pared aguas abajo en Casa de Máquinas**

La tabla 3 nos muestra las fechas de instalación y de lectura inicial de cada uno de los extensómetros y la longitud real de cada una de las barras en la pared aguas abajo de Casa de Máquinas.

No. extensómetro	Fecha de instalación	Fecha de lectura inicial	Cadenamiento	Longitud de las barras (m)			
				Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4
EB-CMPAB01	27-09-04	28-09-04	0+044	3.00	6.00	14.00	28.00
EB-CMPAB02	06-10-04	07-10-04	0+060	3.11	6.18	14.07	28.36
EB-CMPAB03	05-10-04	07-10-04	0+070	3.17	6.23	14.13	28.37
EB-CMPAB04	05-10-04	06-10-04	0+090	3.36	6.19	14.23	28.30
EB-CMPAB05	04-10-04	06-10-04	0+100	3.23	6.37	14.19	28.27
EB-CMPAB06	29-10-04	02-11-04	0+044	3.00	6.00	14.00	28.00
EB-CMPAB07	20-10-04	26-10-04	0+060	3.00	6.00	14.00	28.00
EB-CMPAB08	18-10-04	18-10-14	0+077	3.00	6.00	14.00	28.00
EB-CMPAB09	23-10-04	26-10-04	0+090	3.00	6.00	14.00	28.00
EB-CMPAB10	22-10-04	23-10-04	0+100	3.00	6.00	14.00	28.00
EB-CMPAB11	07-01-05	08-01-05	0+044	3.12	9.07	15.23	21.00
EB-CMPAB12	07-01-05	08-01-05	0+060	3.00	9.00	15.00	21.00
EB-CMPAB13	08-01-05	11-01-05	0+077	3.05	9.27	15.11	21.19
EB-CMPAB14	07-01-05	08-01-05	0+090	3.00	9.00	15.00	21.00
EB-CMPAB15	07-01-05	08-01-05	0+100	3.03	9.17	15.23	21.18

**Tabla 3. Casa de Máquinas pared aguas abajo extensómetros EB-CMPAB**

4.1.2.2 Galería de Oscilación

La bóveda fue instrumentada con seis extensómetros de tres barras de 6, 9 y 15 m de longitud. Desde el cadenamiento 0+010 hasta el cadenamiento 0+062 (Fig.. 16).

De manera similar la nomenclatura utilizada consecutiva EB-GOB01...06 significa Extensómetro de Barra en Galería de Oscilación en la Bóveda asignando una numeración.

La tabla 4 nos muestra las fechas de instalación y lectura inicial de cada uno de los extensómetros con las longitudes reales de las barras en la bóveda de la Galería de Oscilación.

No. extensómetro	Fecha de instalación	Fecha de lectura inicial	Cadenamiento	Longitud de las barras (m)		
				Barra 1	Barra 2	Barra 3
EB-GOB01	16-11-04	25-11-04	0+010	6.00	9.00	15.00
EB-GOB02	26-11-04	27-11-04	0+018	6.00	9.00	15.00
EB-GOB03	26-11-04	27-11-04	0+030	6.00	9.00	15.00
EB-GOB04	23-11-04	06-12-04	0+038	6.00	9.00	15.00
EB-GOB05	04-12-04	06-12-04	0+062	6.00	9.00	12.00
EB-GOB06	07-12-04	06-12-04	0+062	6.00	9.00	15.00

Tabla 4. Galería de Oscilación bóveda extensómetros EBGOB

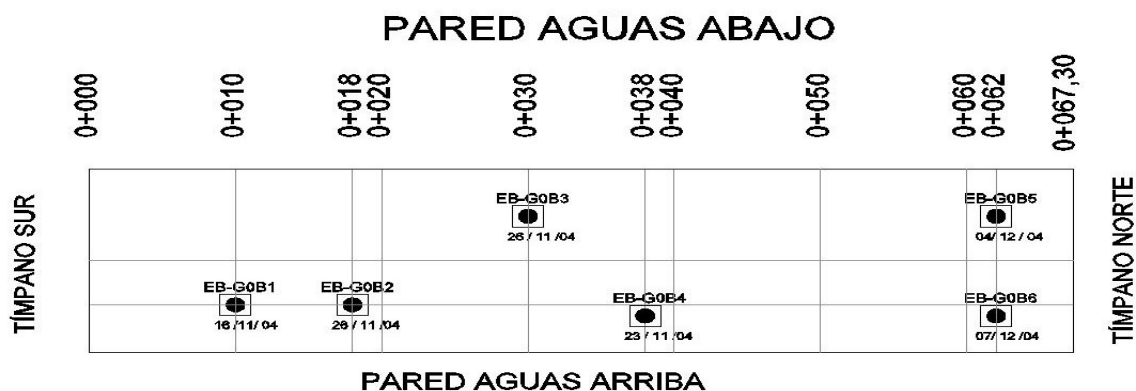


Fig.17 Localización de la instrumentación en la bóveda de Galería de Oscilación

En la pared aguas arriba se instalaron tres extensómetros con tres barras de 3, 9 y 15 m cada uno. Desde el cadenamiento 0+010 al 0+042 (Fig. 17)

La nomenclatura utilizada Extensómetro de Barra en Galería de Oscilación Pared Aguas arriba con numeración consecutiva EB-GOPAR01...03.

La tabla 5 nos muestra las fechas de instalación y lectura inicial de cada uno de los extensómetros con las longitudes reales en la pared aguas abajo de Galería de Oscilación.

No. extensómetro	Fecha de instalación	Fecha de lectura inicial	Cadenamiento	Longitud de las barras (m)		
				Barra 1	Barra 2	Barra 3
EB-GOPAR01	18-02-05	21-02-05	0+042	3.00	9.00	15.00
EB-GOPAR02	18-02-05	15-03-05	0+042	3.00	9.11	15.27
EB-GOPAR03	S/REF	28-04-05	0+030	3.00	9.00	15.00

Tabla 5. Galería de Oscilación pared aguas arriba extensómetros EBPAP

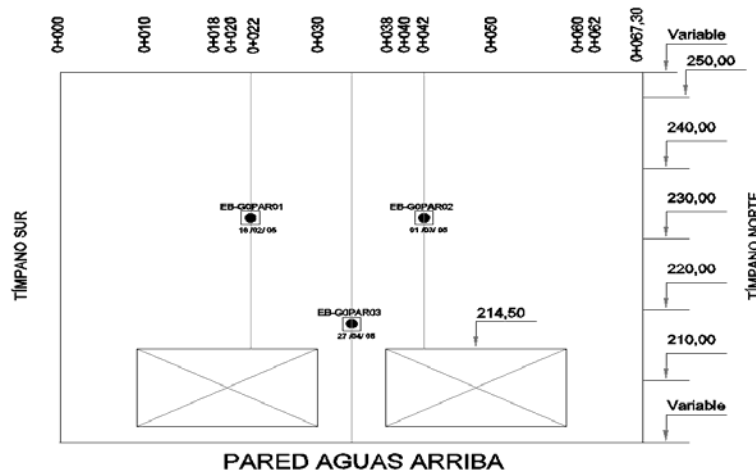


Fig.18 Localización de la instrumentación en la pared aguas arriba en Galería de Oscilación

La pared aguas abajo fue instrumentada con seis extensómetros de tres barras de 3, 9 y 18 m de longitud. Desde el cadenasamiento 0+013.65 hasta el cadenasamiento 0+053.65 (Fig.. 17).

La tabla 6 nos muestra las fechas de instalación y lectura inicial de cada uno de los extensómetros con las longitudes reales de cada barra en la pared aguas abajo de Casa de Máquinas.

No. extensómetro	Fecha de instalación	Fecha de lectura inicial	Cadenamiento	Longitud de las barras (m)		
				Barra 1	Barra 2	Barra 3
EB-GOPAB01	16-11-04	20-01-05	0+013.65	3.00	9.00	18.00
EB-GOPAB02	16-11-04	18-01-05	0+033.65	3.12	9.17	18.07
EB-GOPAB03	16-11-04	19-01-05	053.65	3.23	9.18	18.12
EB-GOPAB04	16-11-04	23-03-05	0+013.65	3.23	9.18	18.12
EB-GOPAB05	S/REF	28-06-05	0+033.65	3.23	9.18	18.12
EB-GOPAB06	S/REF	16-04-05	0+053.65	3.23	9.18	18.12

Tabla 6. Galería de Oscilación pared aguas abajo extensómetros EBPAB



Fig.19 Localización de la instrumentación aguas abajo en Galería de Oscilación

## 4.2 Comportamiento de Casa de Máquinas y Galería de Oscilación

Se presentan las gráficas de las mediciones realizadas de la instrumentación instalada desde la primera medición al mes de diciembre del 2005. Así mismo, se realiza un análisis del comportamiento de Casa de Máquinas y Galería de Oscilación.

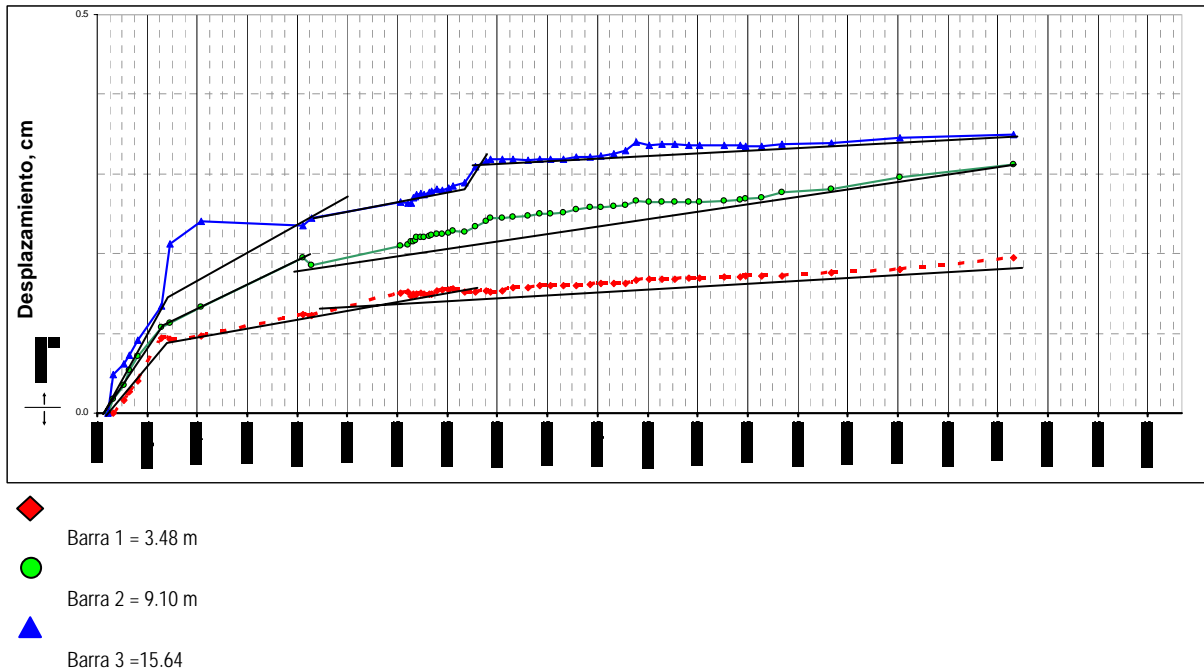
### 4.2.1 Casa de Máquinas

Con base en las gráficas (Gráficos 01 al 34) se observa el siguiente comportamiento en cada una de las estructuras que constituyen la Casa de Máquinas.



### Bóveda

El EB-CMB01 muestra desplazamientos expansivos significativos de 0.94 mm en la barra 1 de 3.48 m y de 2.1 en la barra 3 con 15.64 m en el mes de Agosto de 2004, mientras que en la barra 2 de 9.10 m se registra su máximo desplazamiento en el mes de Noviembre con 1.9 mm. La barra 2 presentó la máxima velocidad de deformación con valor de 1.333 mm/mes en el periodo de Julio y Agosto de 2004.



**Gráfico.1 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMB01**

EB-CMB02 en el periodo de Octubre a Diciembre de 2004 no se pudo acceder al sitio por trabajos de construcción. Los desplazamientos de expansión máximos observados fueron en el mes de Enero de 2005 con 3.4, 4.7 y 5.7 mm en la barra de 3, 9 y 12 m respectivamente. La máxima deformación se observó en la barra 2 en los meses de Enero a Julio de 2005 con valor de 8.332 mm/mes,

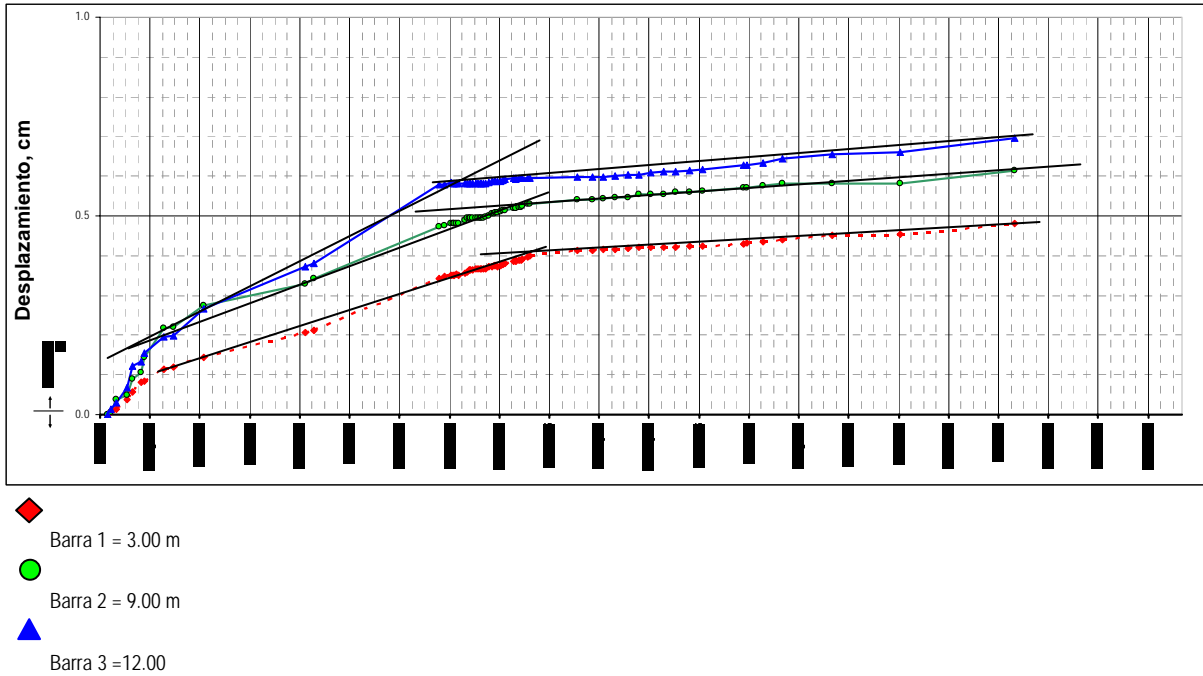


Gráfico.2 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMB02

En el EB-CMB03 durante Septiembre, Octubre y principios de Noviembre de 2004 no hay mediciones por trabajos de construcción en el sitio y en Agosto de 2005 el acceso es destruido por la grúa viajera. La velocidad de desplazamiento registrada fue mínima en todas sus barras teniendo como valor máximo 0.176 mm/mes en la barra 2, en los meses de Noviembre de 2004 a Mayo de 2005.

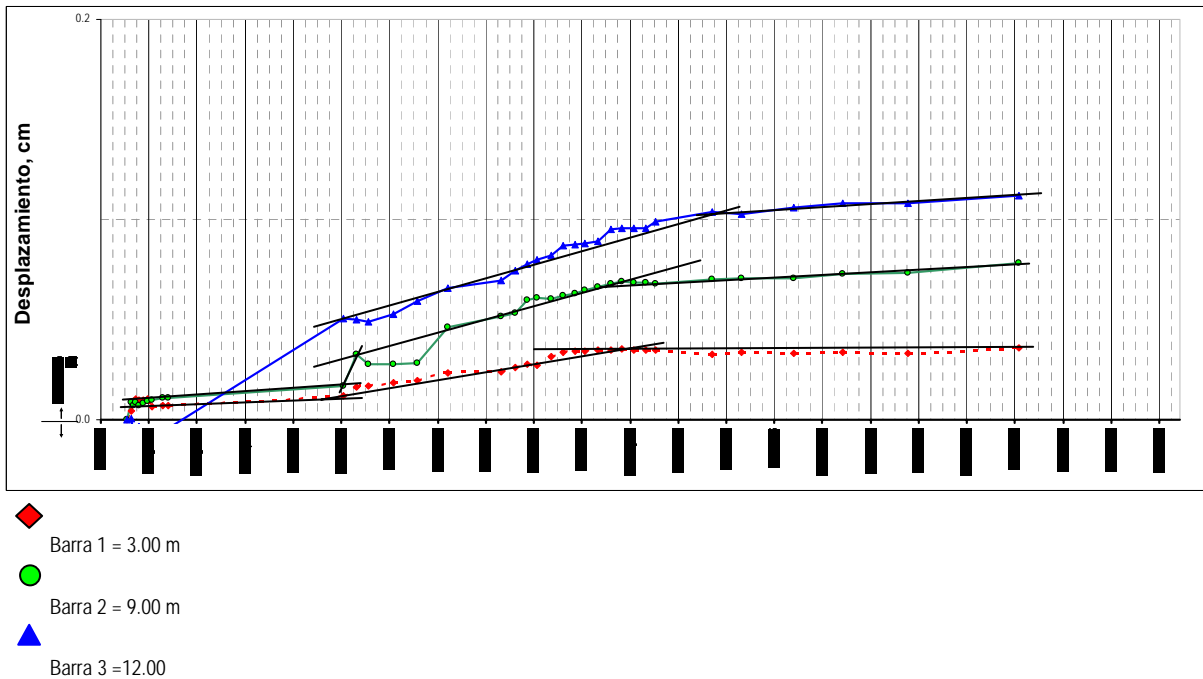


Gráfico.3 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMB03

El EB-CMB04 presentó en el mes de Agosto de 2004 filtraciones elevando la continuidad en sus mediciones, en Septiembre y Octubre del mismo año no hubo mediciones por trabajos de construcción en el sitio y en Julio de 2005 fue destruido el acceso por la grúa viajera.

El EB-CMB05 se ve afectado en el mes de Julio de 2004 por las voladuras aguas abajo, en el mes de Septiembre no se pudo acceder por trabajos en el sitio y en Mayo de 2005 el acceso es destruido por la grúa viajera.

En ambos extensómetros no se tienen mediciones confiables para su análisis.

El EB-CMB06 durante los meses de Septiembre de 2004 a Marzo de 2005 no hubo mediciones por trabajos de construcción y habilitado de accesos en la zona, presentando un desplazamiento menor a 0.01 mm en todas sus barras y una velocidad de 0.004 mm/mes.

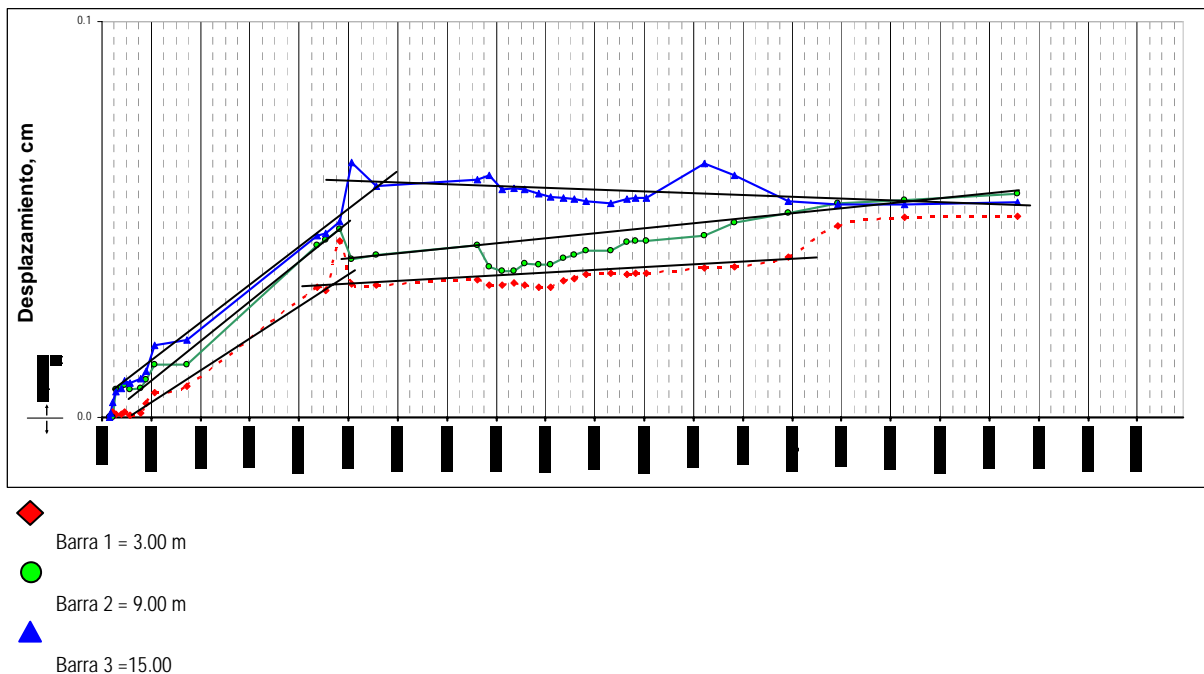
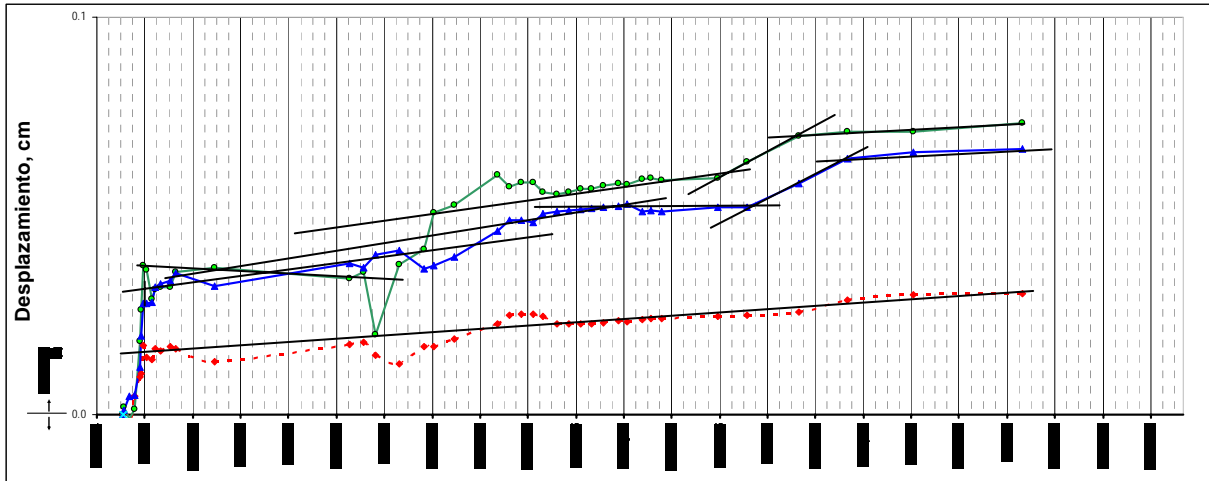
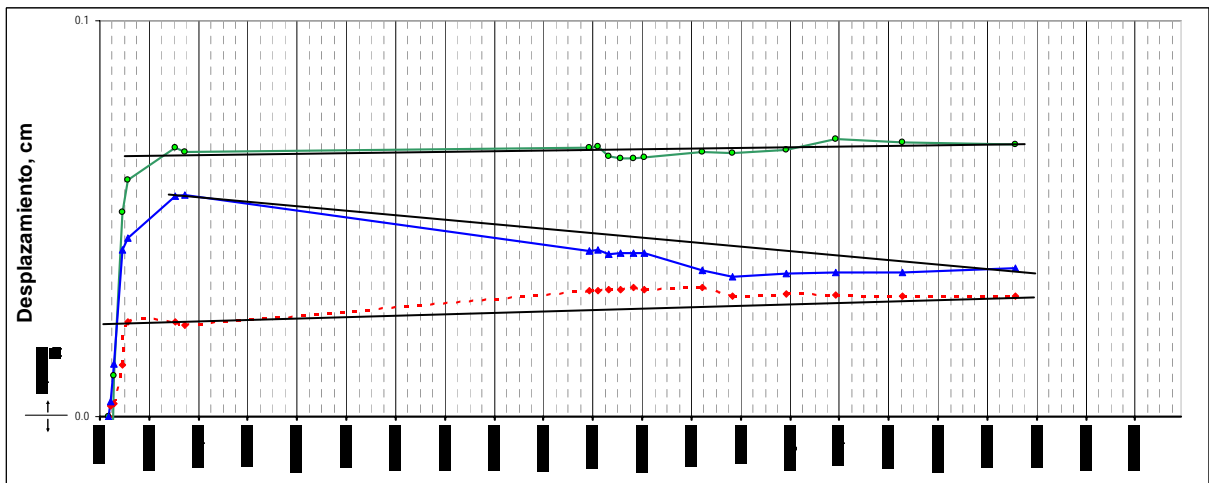


Gráfico.4 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMB04



- ◆ Barra 1 = 3.46 m
- Barra 2 = 9.57 m
- ▲ Barra 3 = 12.62

Gráfico.5 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMB05



- ◆ Barra 1 = 3.00 m
- Barra 2 = 9.00 m
- ▲ Barra 3 = 15.00

Gráfico.6 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMB06

El EB-CMB07 dejó de funcionar por la destrucción del acceso por el paso de la grúa viajera.

El EB-CMB08 durante los meses de Octubre y Noviembre de 2004 no fue medido por trabajos de construcción en la zona. En el mes de Agosto 2004 se presenta un desplazamiento considerable debido a la voladura en la sección media aguas arriba en la zona. El desplazamiento máximo registrado fue en el mes de febrero con 7.1, 9.4, y 8.9 mm en las barras 3, 9 y 12 m respectivamente y una velocidad de 0.364 en las barras de 9 y 12 m.

La lectura inicial en el EB-CMB09 fue el 20 de Agosto de 2004 por el cabezal que se dañó por la voladura del 23 de Julio del mismo año, en el mes de noviembre no hubo mediciones por trabajos de construcción en el sitio. En este extensómetro se registraron desplazamientos menores a 0.01 mm en todas sus barras y velocidades poco significativas.

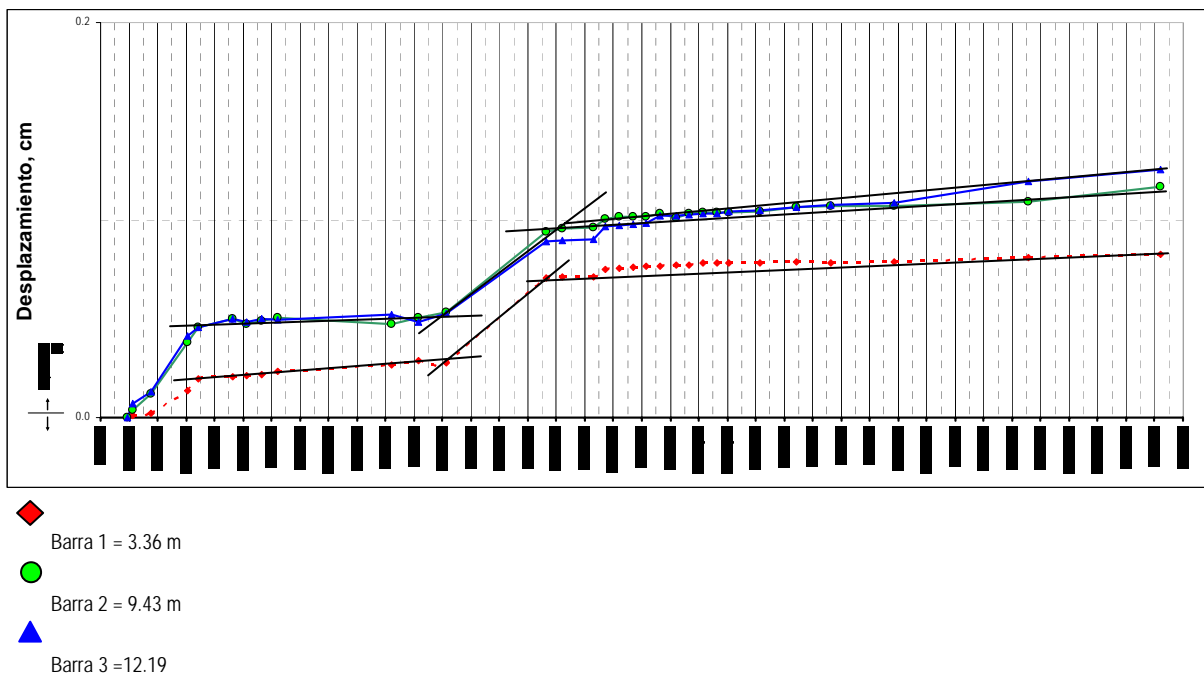


Gráfico.7 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMB08

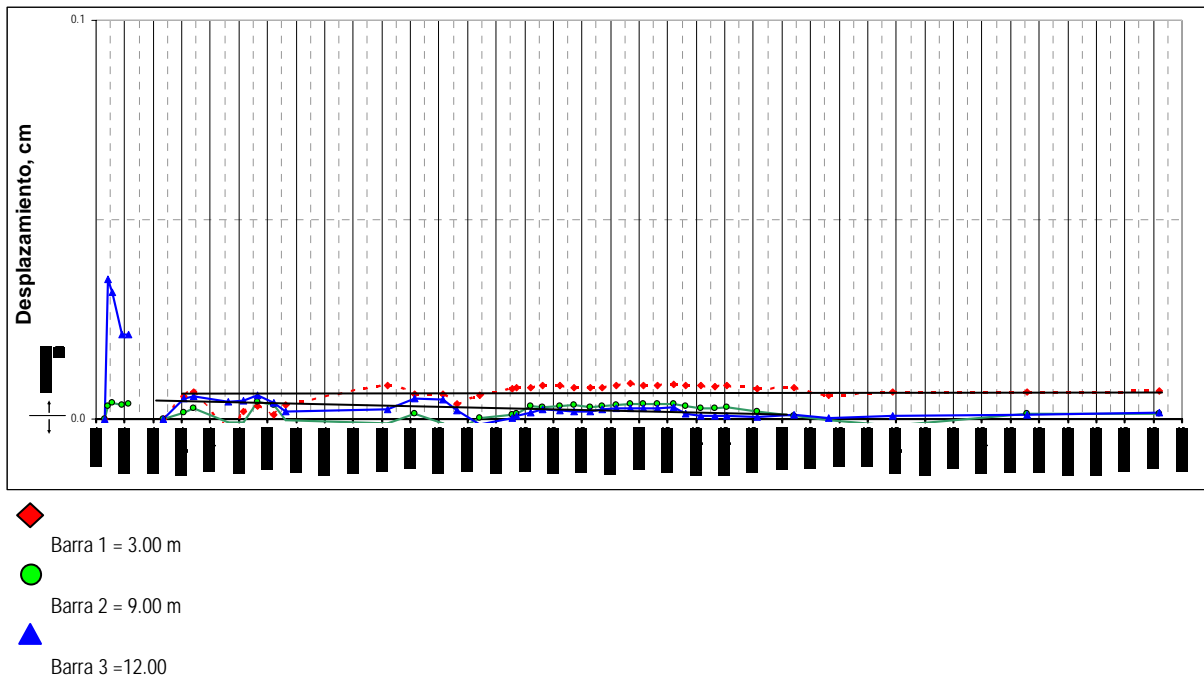


Gráfico.8 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMB09

El EB-CMB10 presentó un desplazamiento promedio de 0.02 mm con velocidades mínimas en todas sus barras, en el mes de Noviembre de 2004 no hubo registro de mediciones por trabajos de construcción en la zona.

En el EB-CMB11 durante el mes de Noviembre de 2004 por trabajos de construcción en la zona no hubo mediciones. En Agosto de 2004 la barra de 12 m registra un desplazamiento máximo de 6.8 mm, la barra de 9 m en Diciembre del mismo año registra 0.9 mm y en Enero de 2005 la barra de 3 m registra 6.0 mm con velocidades mínimas.

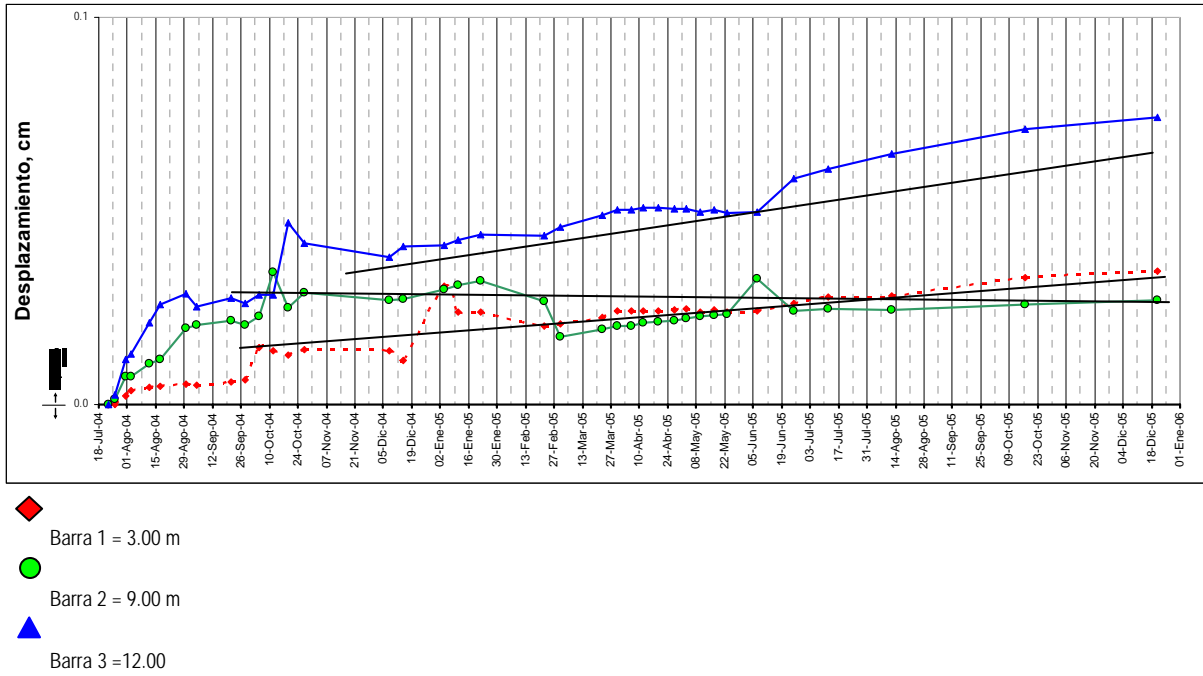


Gráfico.9 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMB010

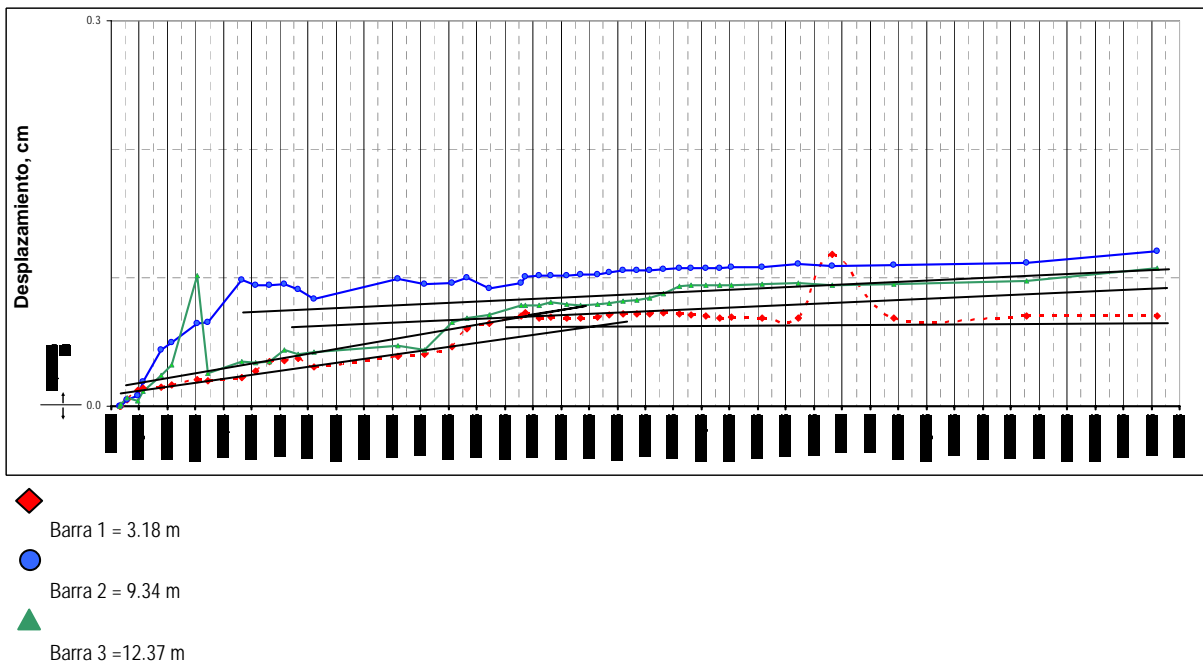
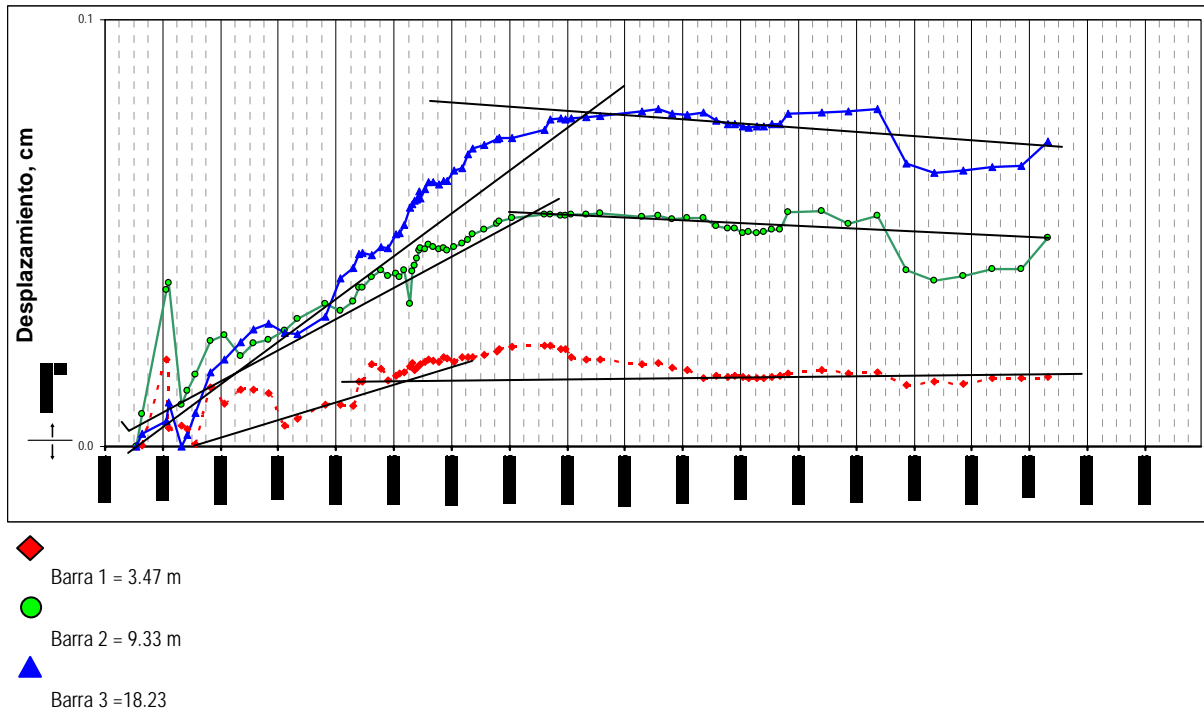


Gráfico.10 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMB011

*Pared aguas arriba*

EB-CMPAR01 su máximo desplazamiento acumulado se presentó en el mes de Noviembre de 2004 con 1.4, 2.5 y 1.7 mm en las barras 3, 9 y 18 m respectivamente. Con una velocidad de deformación de 0.952 mm/mes en la barra 3.



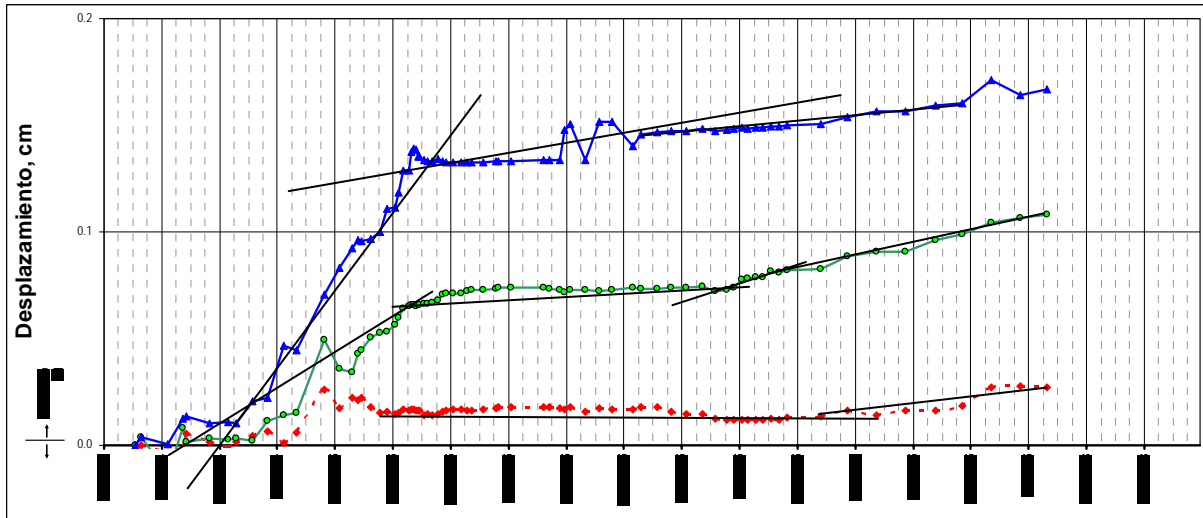
**Gráfico.11 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAR01**

EB-CMPAR02 presentó un desplazamiento de 0.01 mm y velocidades mínimas durante todo el periodo de estudio, en cada una de las barras.

EB-CMPAR03 registra su máximo desplazamiento en el mes de Septiembre del 2005 con 7 mm en la barra de 18 m y una velocidad de deformación de 0.08 mm/mes en la misma barra.

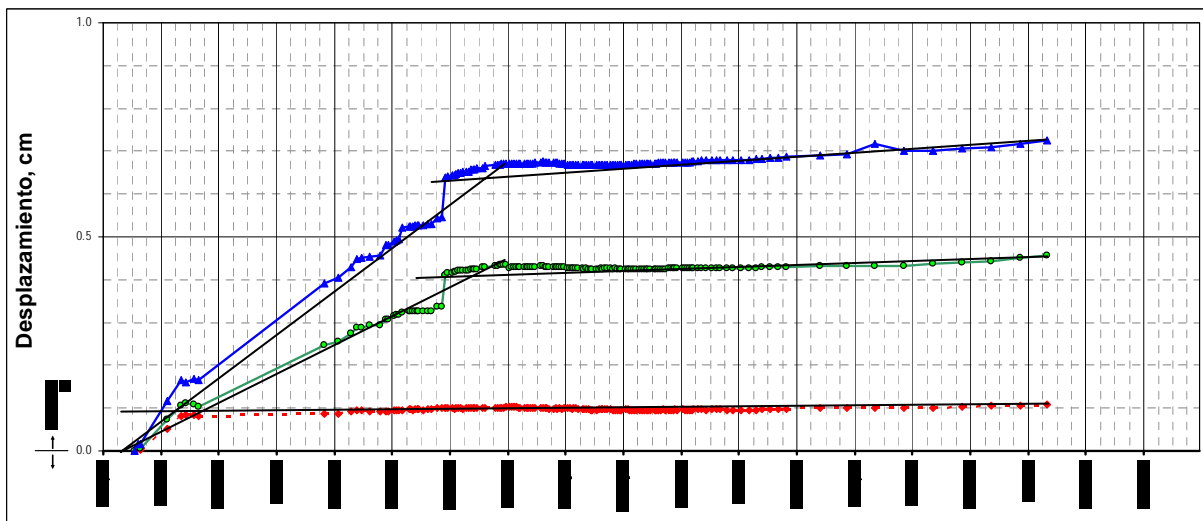
EB-CMPAR04 en el periodo de Noviembre de 2004 a Enero de 2005 se realizan trabajos de construcción en el sitio reanudando las mediciones en el mes de Febrero de 2005. Este extensómetro mostró un aumento en su desplazamiento de 0.01 mm aproximadamente. Con una velocidad de 1.052 mm/mes en la barra 3.





- ◆ Barra 1 = 3.12 m
- Barra 2 = 9.16 m
- ▲ Barra 3 = 18.03 m

Gráfico.12 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAR02



- ◆ Barra 1 = 3.12 m
- Barra 2 = 9.16 m
- ▲ Barra 3 = 18.03 m

Gráfico.13 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAR03

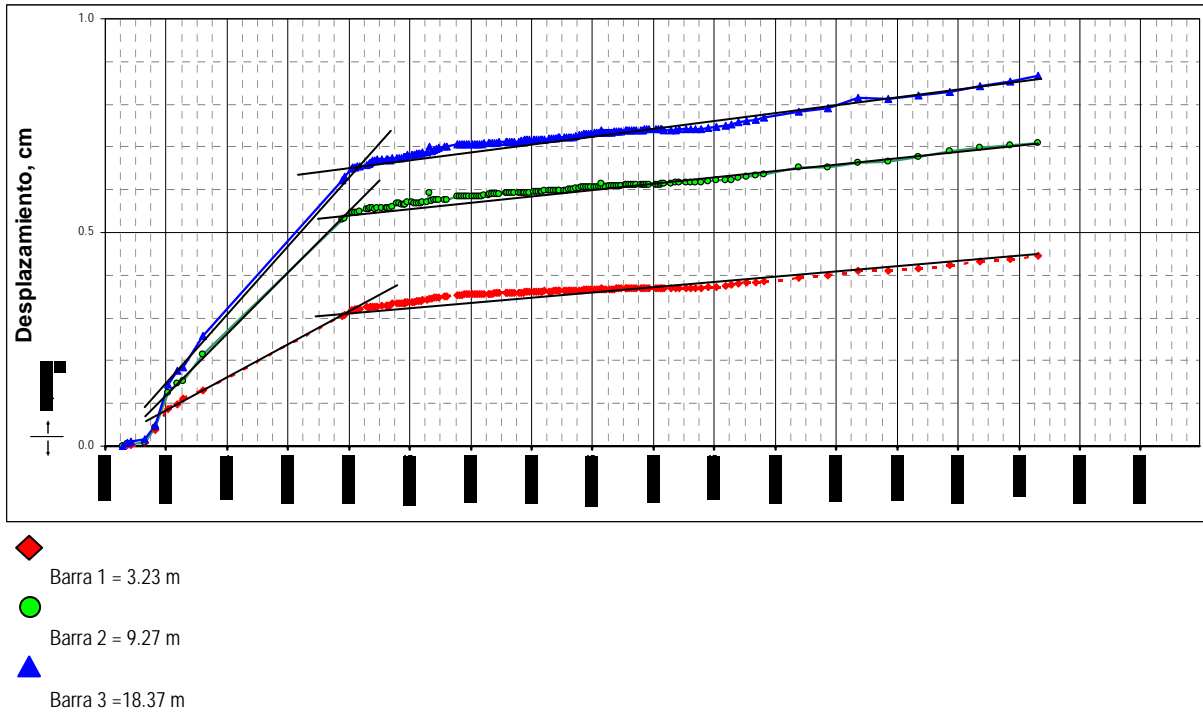


Gráfico.14 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAR04

EB-CMPAR05 en los meses de Diciembre de 2004 a Enero de 2005 se realizan las voladuras de banqueo en la zona, reanudando las mediciones en el mes de Febrero de 2005. Se observó un aumento continuo en sus desplazamientos de 0.01 mm aproximadamente. Con una velocidad de deformación con valor de 0.136 mm/mes.

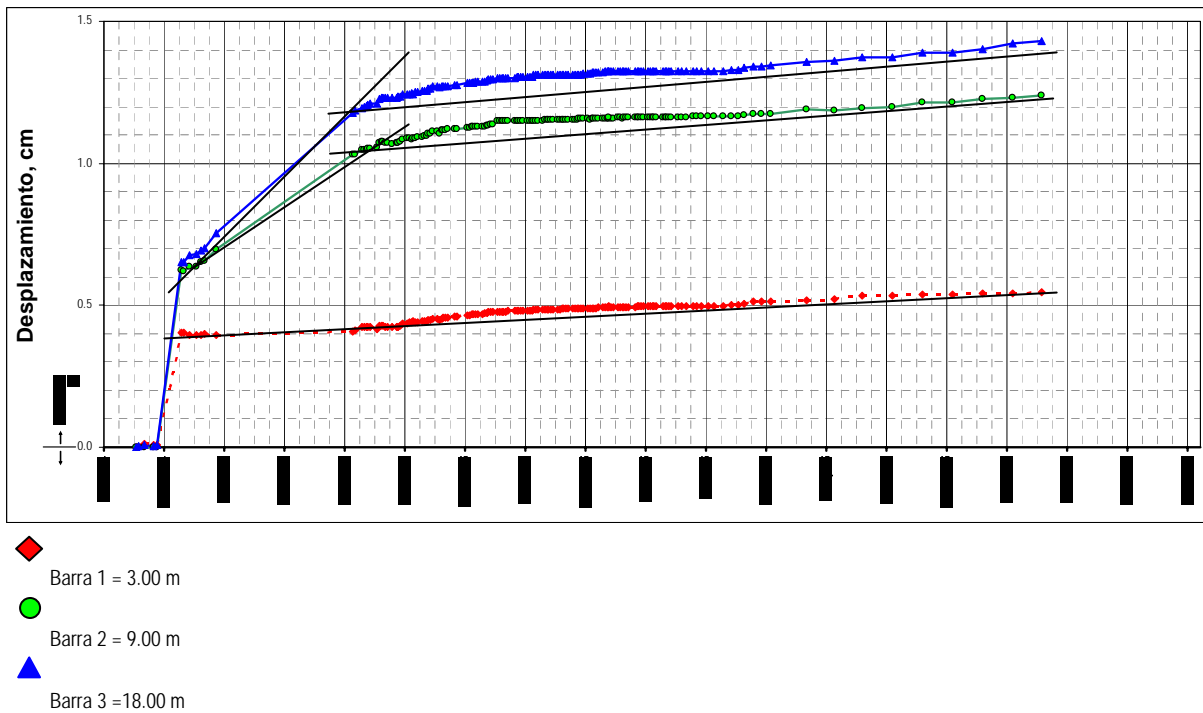
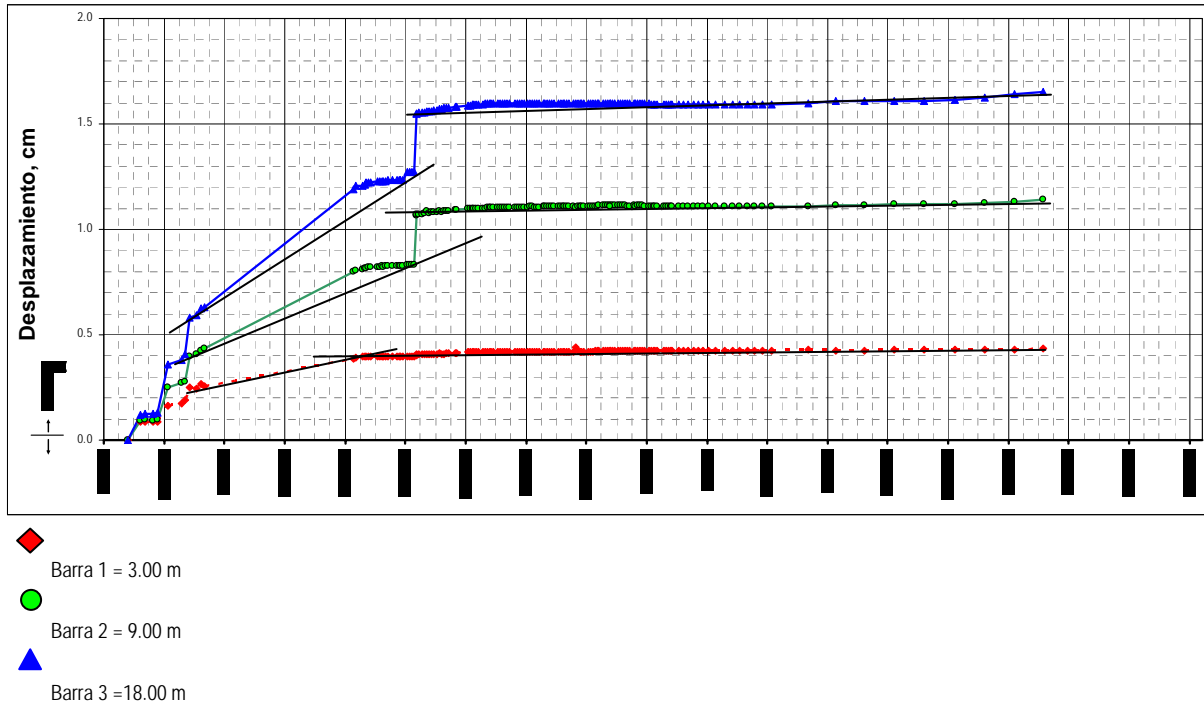


Gráfico.15 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAR05

EB-CMPAR06 durante Diciembre de 2004 a Enero de 2005 hubo voladuras de banqueo a 10 m en la elevación 224, se perfora para anclaje abajo del extensómetro, reanudándose las mediciones en el mes de Febrero de 2005, en Marzo del mismo año se presenta otra voladura en la galería de ventilación. El valor máximo registrado fue de 5 mm en la barra de 9 m. En general el extensómetro presentó un aumento en sus desplazamientos menor de 0.01 mm con velocidad de deformación de 0.22 mm/mes.



**Gráfico.16 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAR06**

El extensómetro EB-CMPAR07, registró movimientos muy pequeños con valores máximos de 0.74 mm en la barra 3 con velocidad de deformación de 0.096 mm/mes.

El extensómetro EB-CMPAR08 la barra de 18 m se obstruye por varilla impidiendo su medición en el mes de Marzo de 2005. La barra de 9 m se pierde por colado en el mes de Octubre de 2005. La barra de 3 m muestra un desplazamiento de 0.01 mm aproximadamente y velocidad de deformación de 0.12 mm/mes.

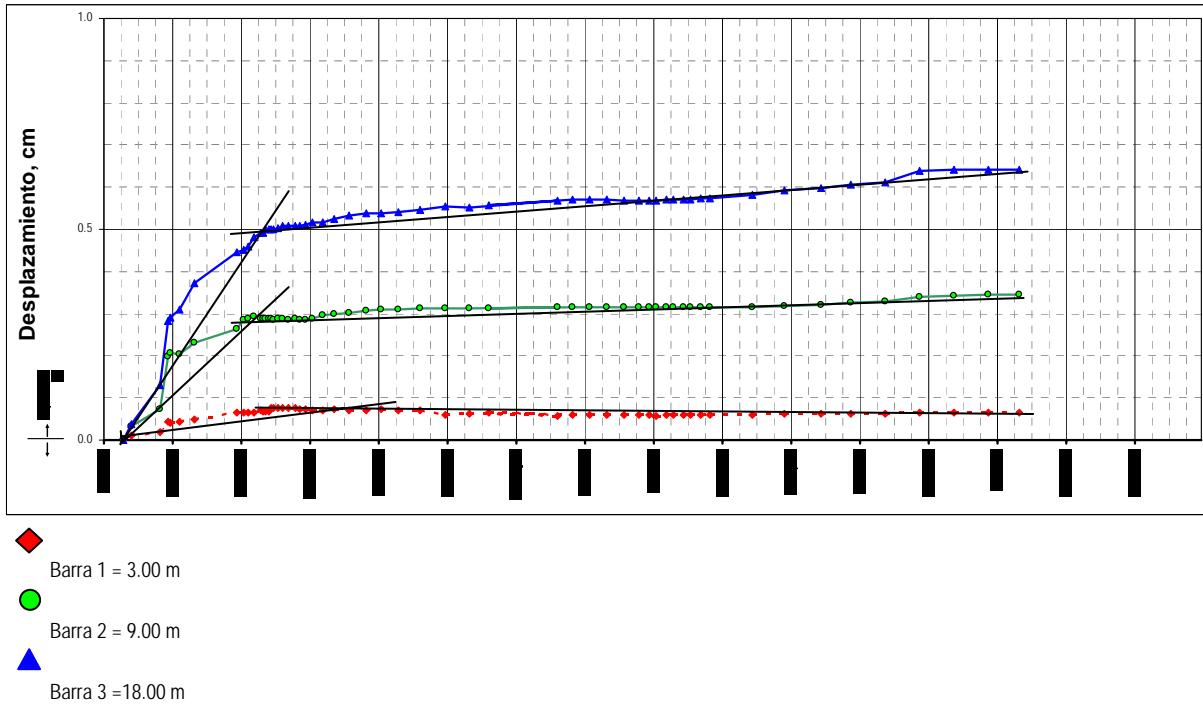


Gráfico.17 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAR07

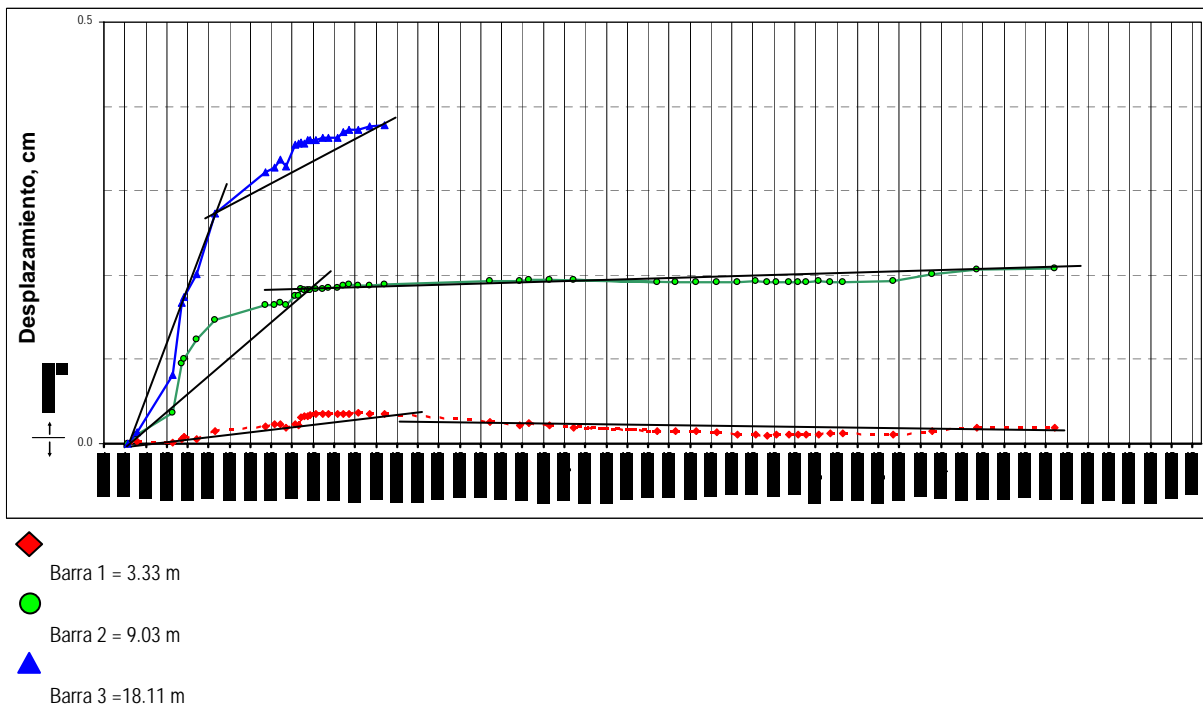


Gráfico.18 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAR08

El extensómetro EB-CMPAR09 se pierde en Octubre del 2005 por colado en la zona, en los meses de Enero y Febrero se presentan voladuras de banqueo y Galería de Oscilación, así como trabajos de construcción en la zona. La tendencia de los movimientos en cada una de las barras a partir del mes de Marzo es menor a 0.01 mm y velocidad de deformación de 0.012 mm/mes.

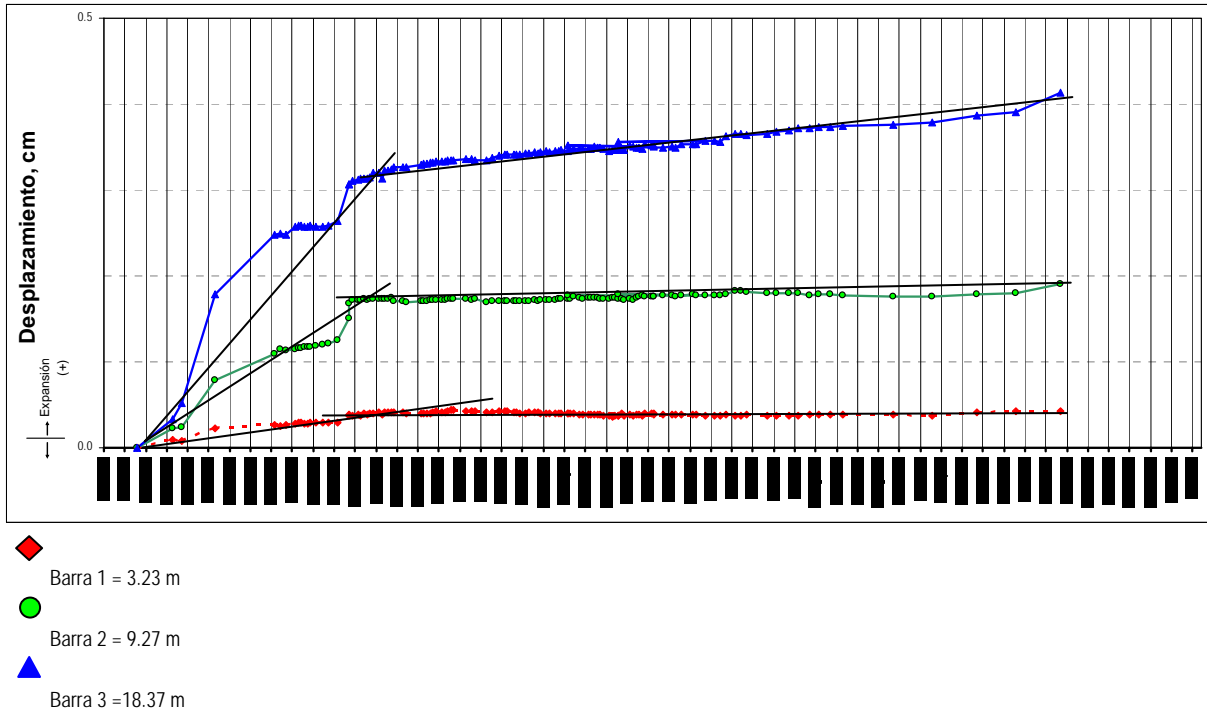
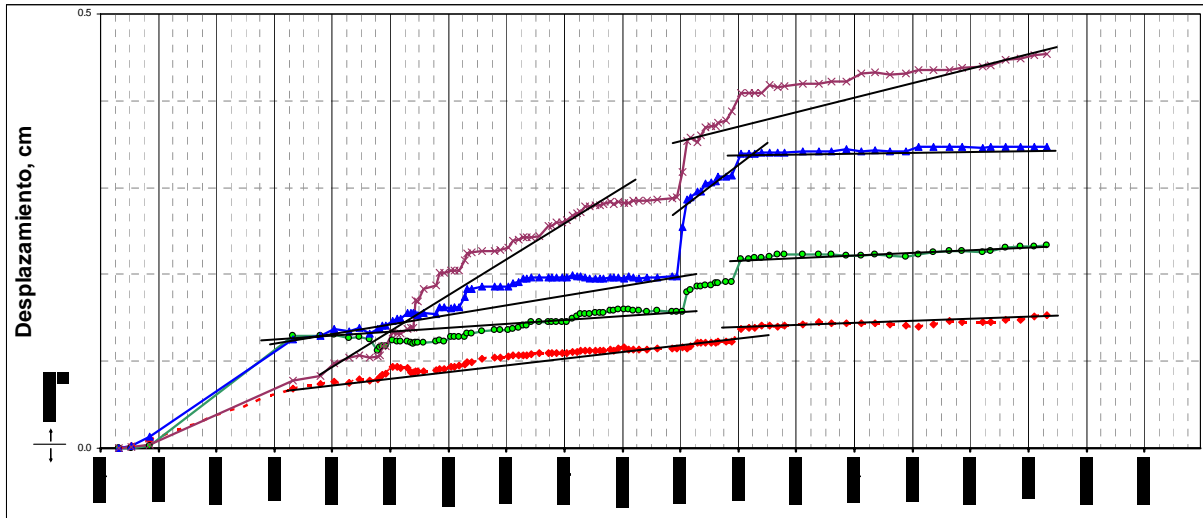


Gráfico.19 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAR09

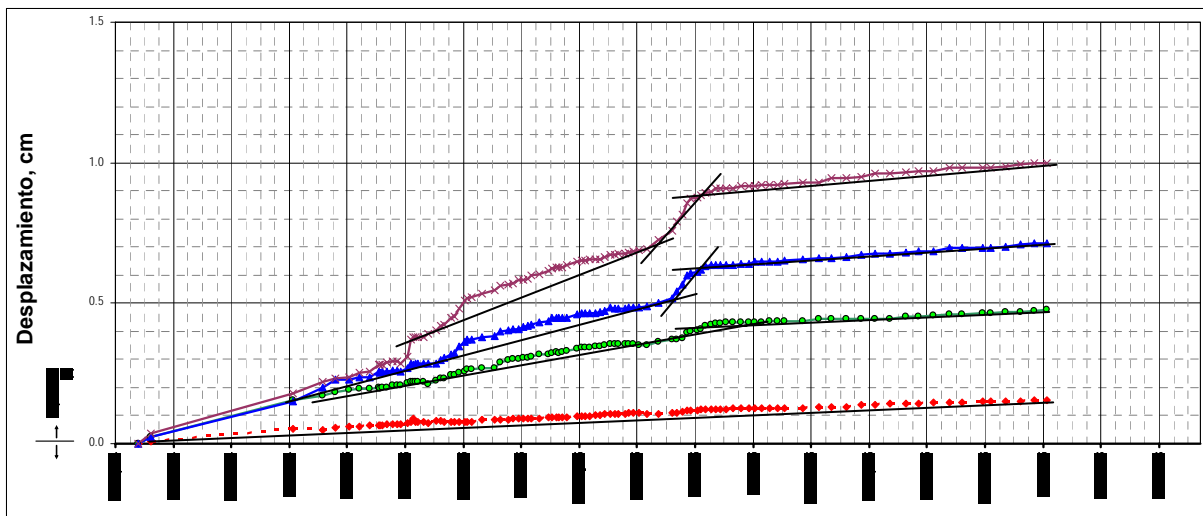
### *Pared aguas abajo*

El EB-CMPAB01, 02, 03 y 04 presentaron desplazamientos de 0.01 y 0.02 mm aproximadamente una vez concluidas las voladuras en galería de buses y Galería de Oscilación.



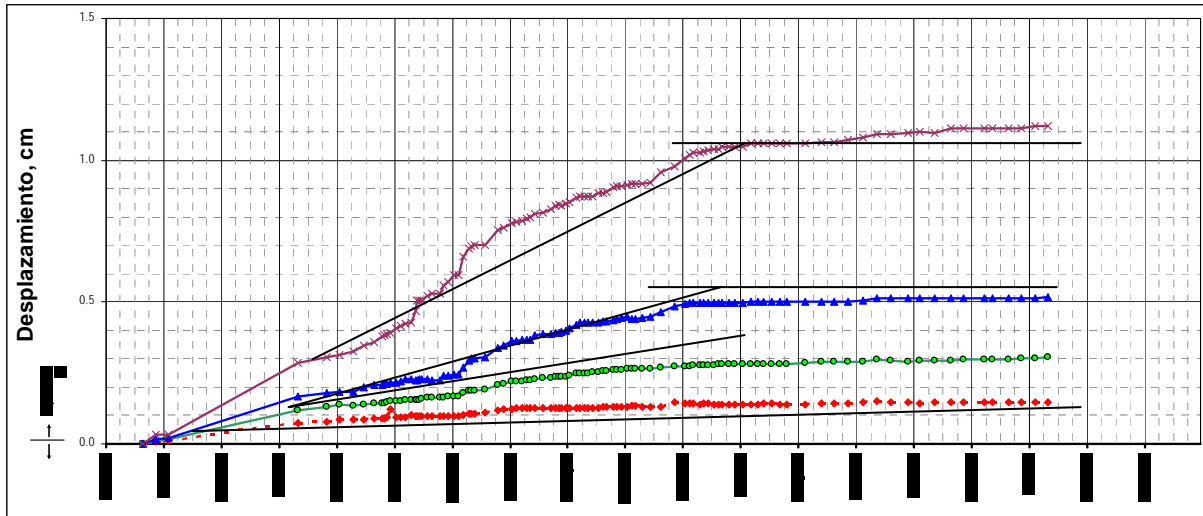
- ◆ Barra 1 = 3.00 m
- Barra 2 = 6.00 m
- ▲ Barra 3 = 14.00 m
- × Barra 4 = 28.00 m

Gráfico.20 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAB01



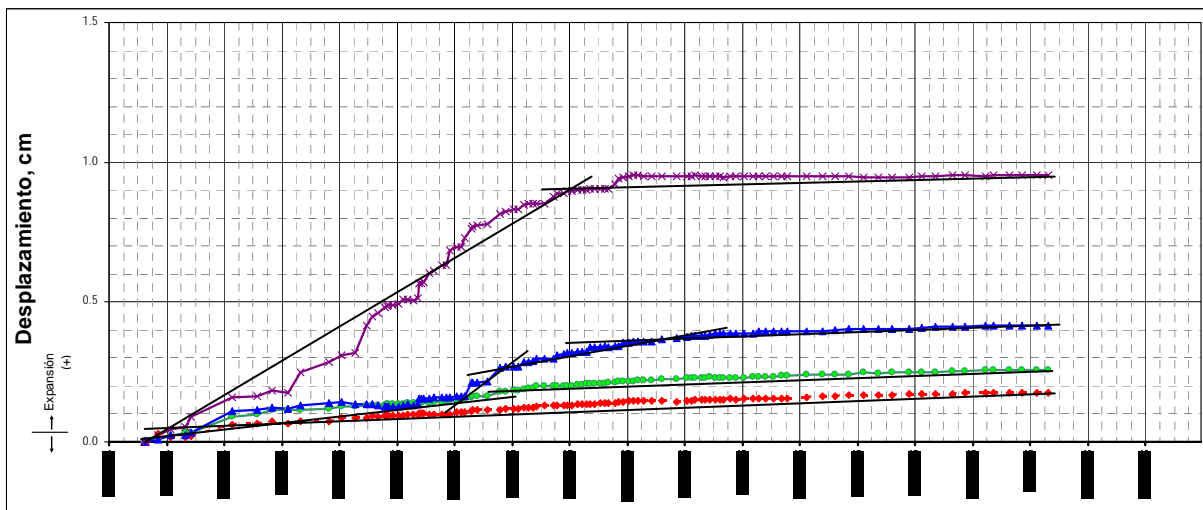
- ◆ Barra 1 = 3.11 m
- Barra 2 = 6.18 m
- ▲ Barra 3 = 14.07 m
- × Barra 4 = 28.36 m

Gráfico.21 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAB02



- ◆ Barra 1 = 3.17 m
- Barra 2 = 6.23 m
- ▲ Barra 3 = 14.13 m
- × Barra 4 = 28.37 m

Gráfico.22 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAB03



- ◆ Barra 1 = 3.36 m
- Barra 2 = 6.19 m
- ▲ Barra 3 = 14.23 m
- × Barra 4 = 28.30 m

Gráfico.23 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAB04

El extensómetro EB-CMPAB05 presentó un desplazamiento menor a 0.01 mm aproximadamente. Con velocidad de deformación de 0.104 mm/mes en todas las barras.

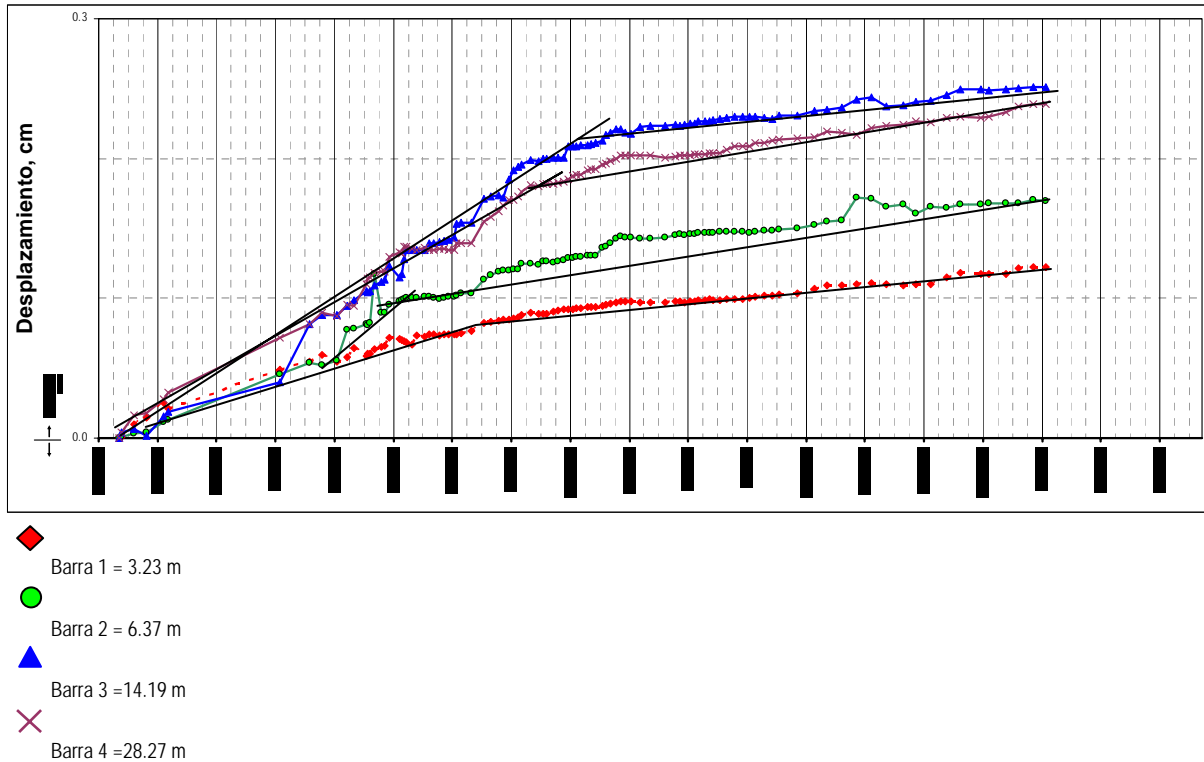
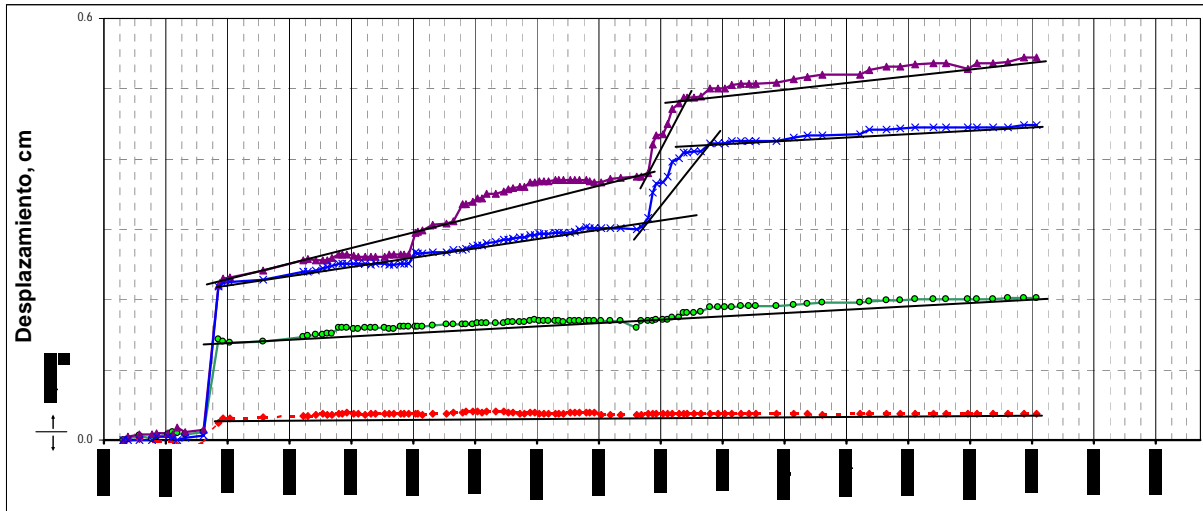


Gráfico.24 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAB05

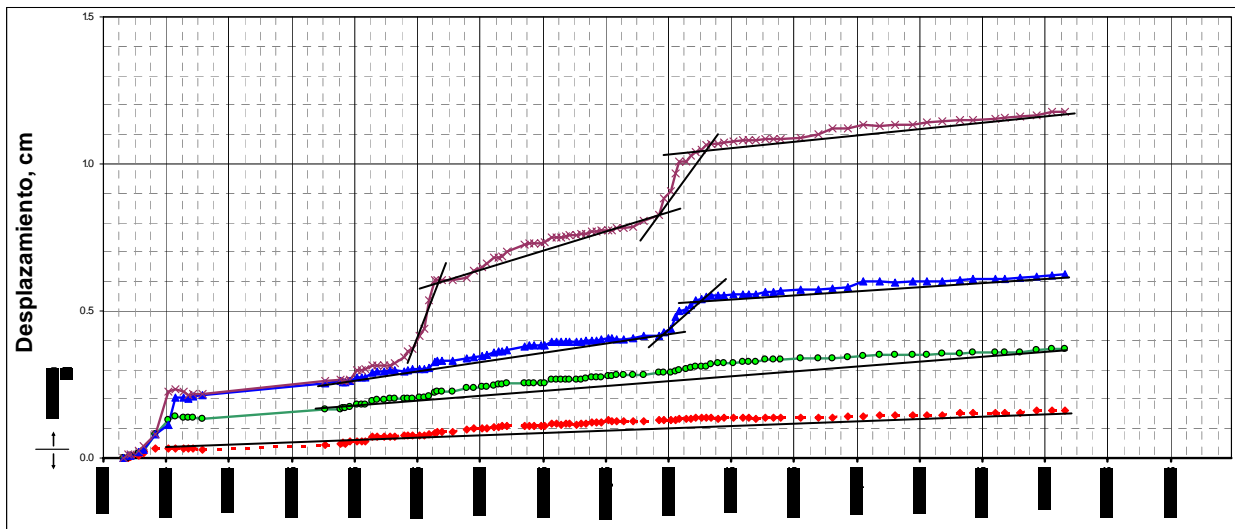
El EB-CMPAB06 y 07 presentaron desplazamientos de 0.01 y 0.02 mm constantes una vez concluidas las voladuras en galería de buses y Galería de Oscilación. Con velocidad de deformación de 0.08 mm/mes, y 0.16 mm/mes respectivamente.





- ◆ Barra 1 = 3.00 m
- Barra 2 = 6.00 m
- ▲ Barra 3 = 14.00 m
- ✕ Barra 4 = 28.00 m

Gráfico.25 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAB06



- ◆ Barra 1 = 3.00 m
- Barra 2 = 6.00 m
- ▲ Barra 3 = 14.00 m
- ✕ Barra 4 = 28.00 m

Gráfico.26 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAB07

La barra de 3 m del extensómetro EB-CMPAB08 fue obstruida por varilla de soporte de escalera de acceso, una vez concluidas las voladuras en Galería de Oscilación la tendencia del movimiento en las barras fue de 0.01 mm aproximadamente. Presentó una velocidad mínima no significativa.

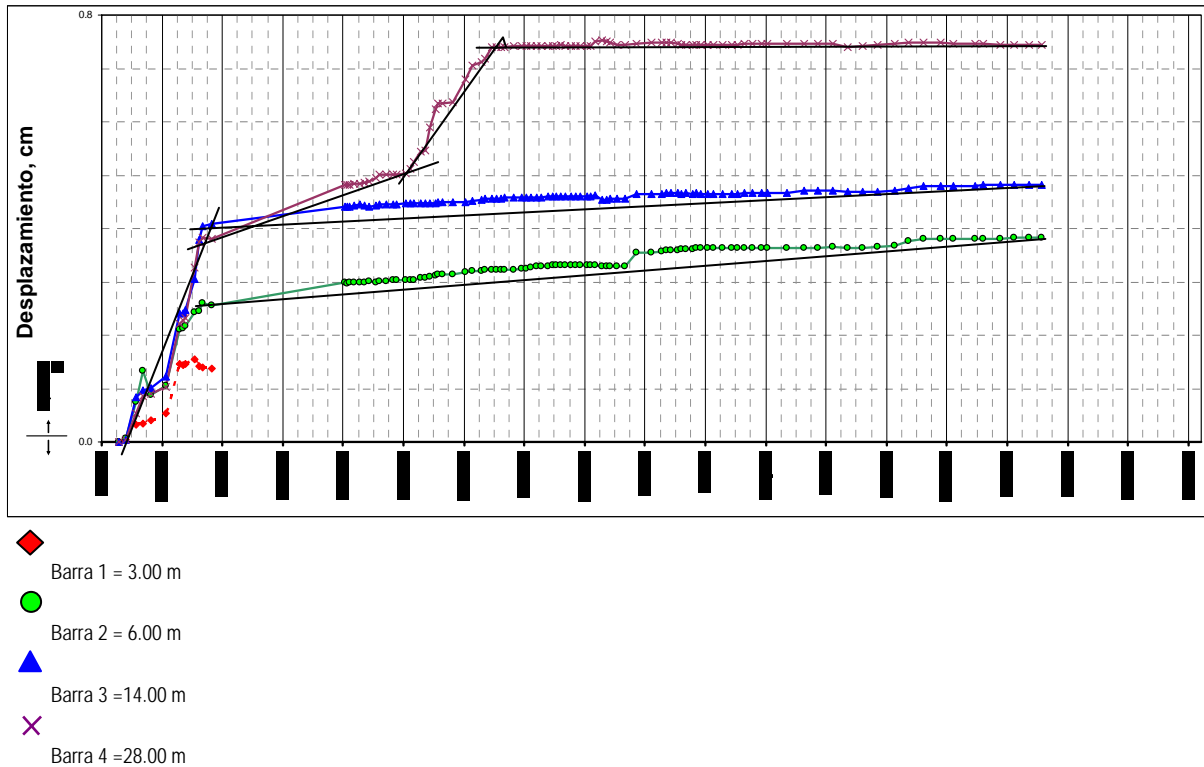
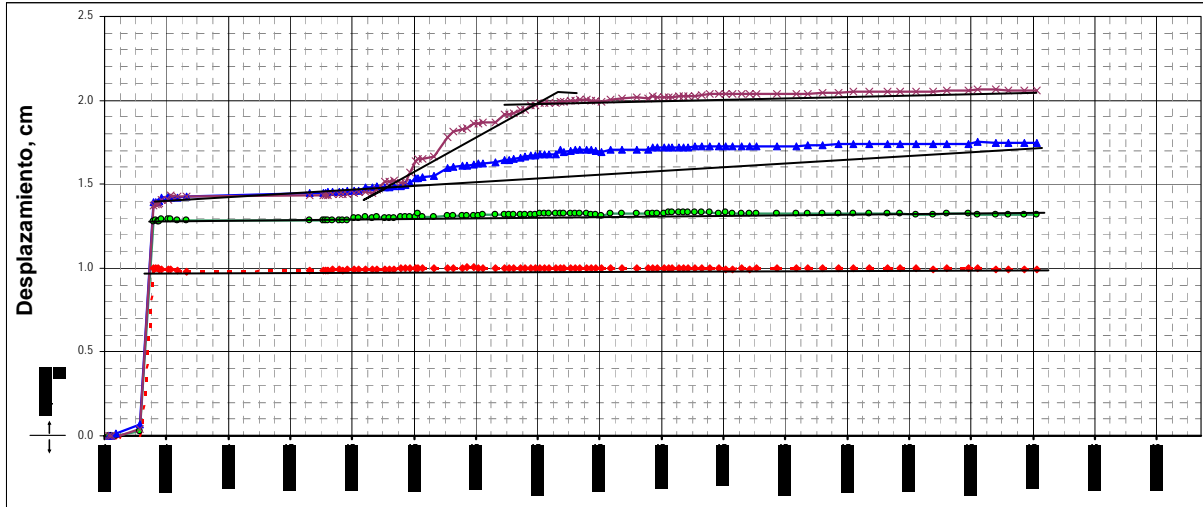


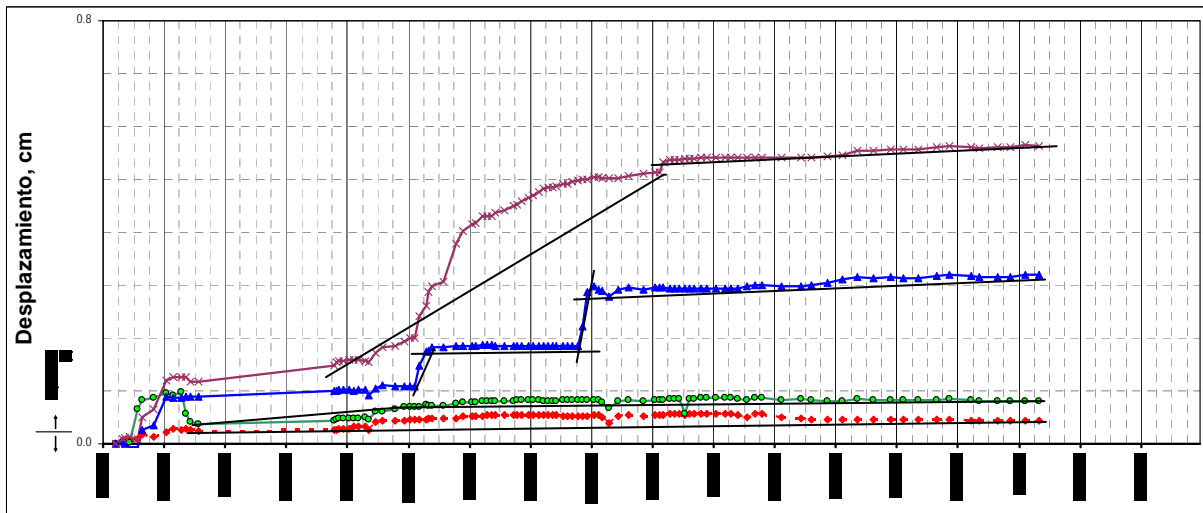
Gráfico.27 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAB08

El EB-CMPAB09 y 10 una vez concluidas las voladuras en Galería de Oscilación y galería de buses presentaron desplazamientos de 0.01 y 0.02 mm y velocidad de deformación de 0.08 mm/mes en ambos extensómetros.



- ◆ Barra 1 = 3.00 m
- Barra 2 = 6.00 m
- ▲ Barra 3 = 14.00 m
- × Barra 4 = 28.00 m

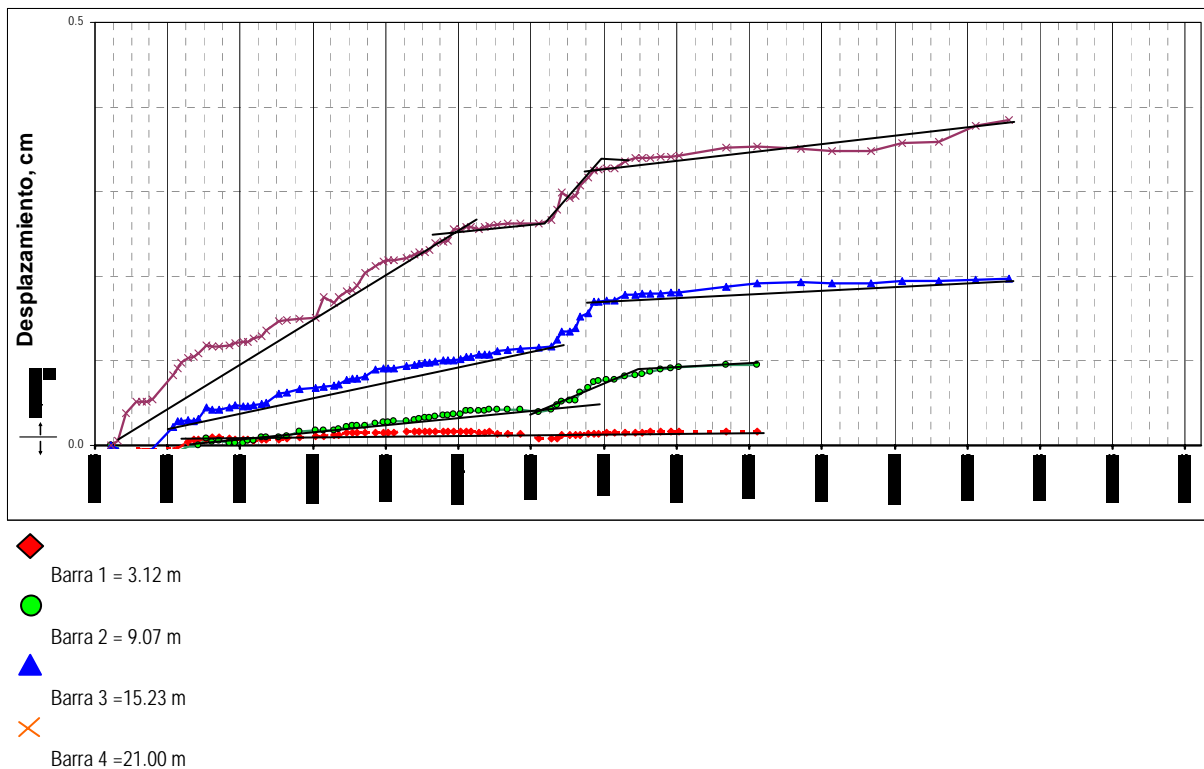
Gráfico.28 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAB09



- ◆ Barra 1 = 3.00 m
- Barra 2 = 6.00 m
- ▲ Barra 3 = 14.00 m
- × Barra 4 = 28.00 m

Gráfico.29 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAB10

Las barras de 3 y 9 m del extensómetro EB-CMPAB11 fueron obstruidas por armado, a partir del mes de julio las lecturas son constantes con una velocidad de deformación de 0.036 mm/mes.



**Gráfico.30 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAB11**

El EB-CMPAB12 presentó desplazamientos de 0.01 y 0.02 mm aproximadamente una vez concluidas las voladuras en galería de buses y Galería de Oscilación. Con una velocidad de deformación de 6 mm/mes.

El extensómetro EB-CMPAB13 se pierde en el mes de julio por colado. Este extensómetro presentó desplazamientos de 0.01 y 0.02 mm en todas sus barras. La velocidad de deformación máxima se observó en la barra 4 con valor de 1.6 mm/mes.

En el extensómetro EB-CMPAB14 durante los meses de Septiembre y Octubre de 2005 no se tomaron lecturas ya que fueron obstruidas por escalera reanudando las mediciones en el mes de Noviembre registrando movimientos de 0.01 mm aproximadamente con una velocidad de 0.032 mm/mes.

El extensómetro EB-CMPAB15 presentó un movimiento constante de 0.02 mm aproximadamente y velocidad de 0.096 mm/mes en todas sus barras, este extensómetro se pierde en el mes de Junio por colado.

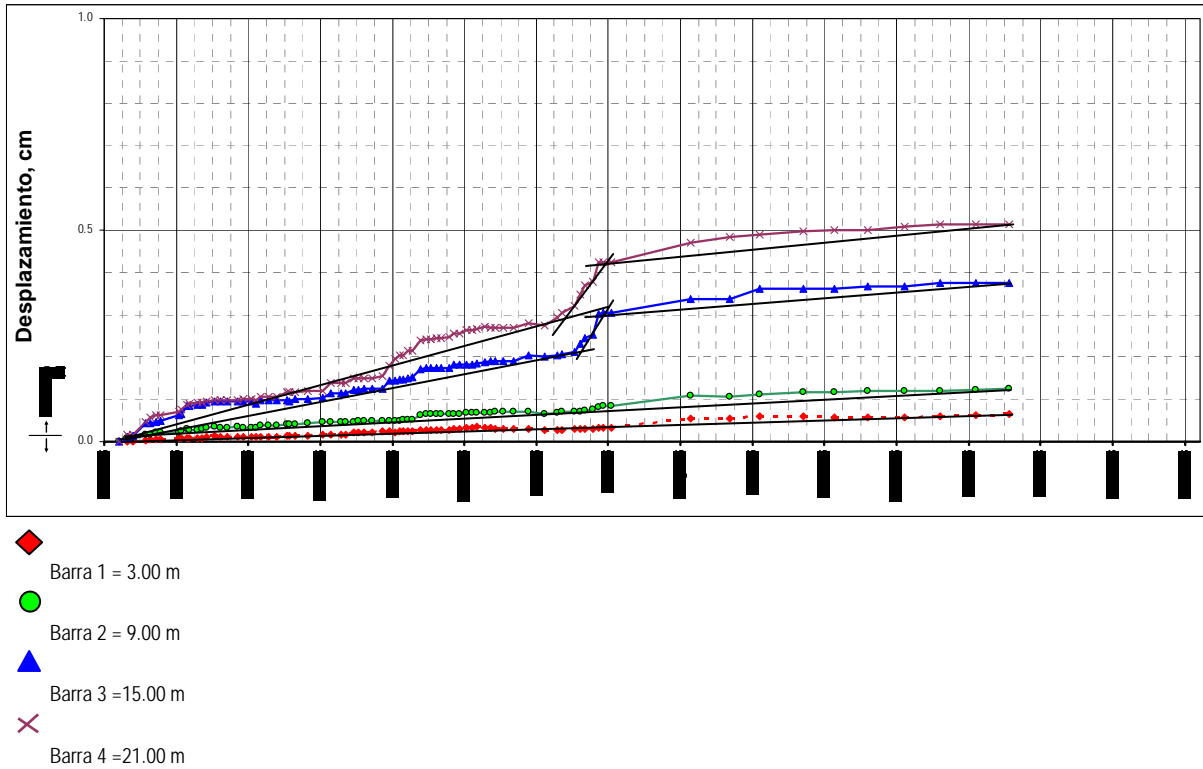


Gráfico.31 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAB12

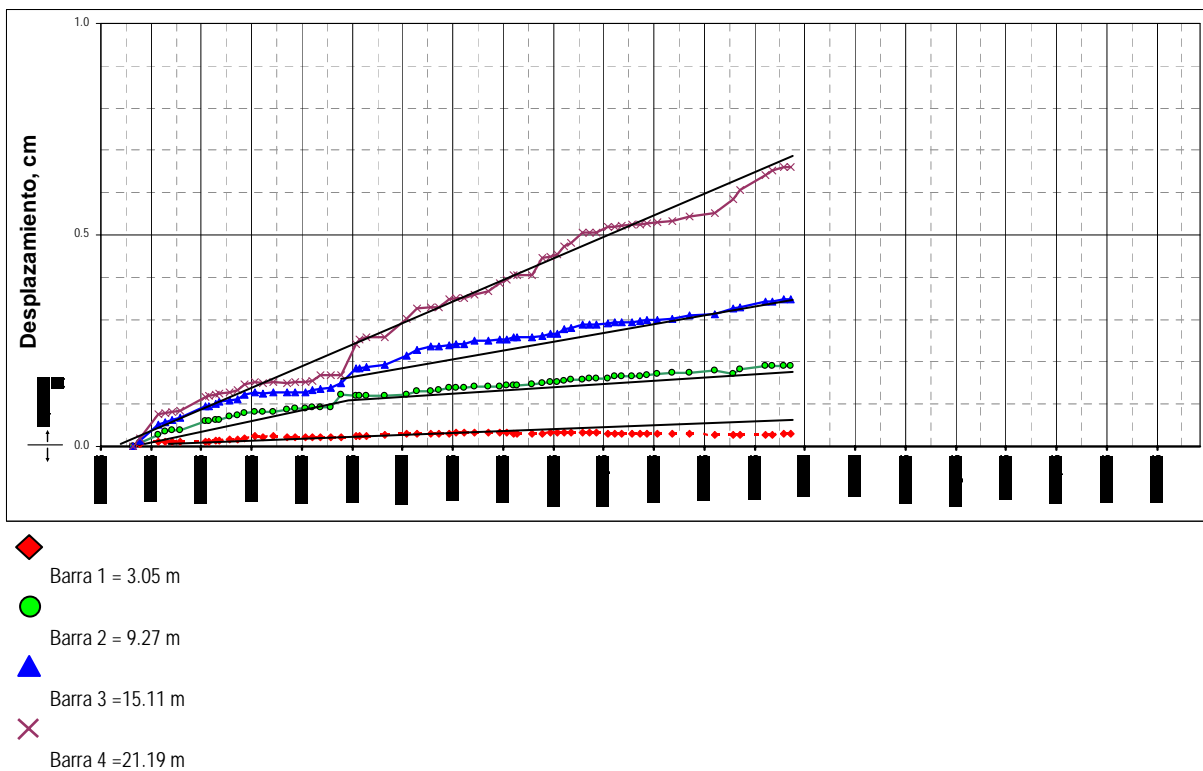


Gráfico.32 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAB13

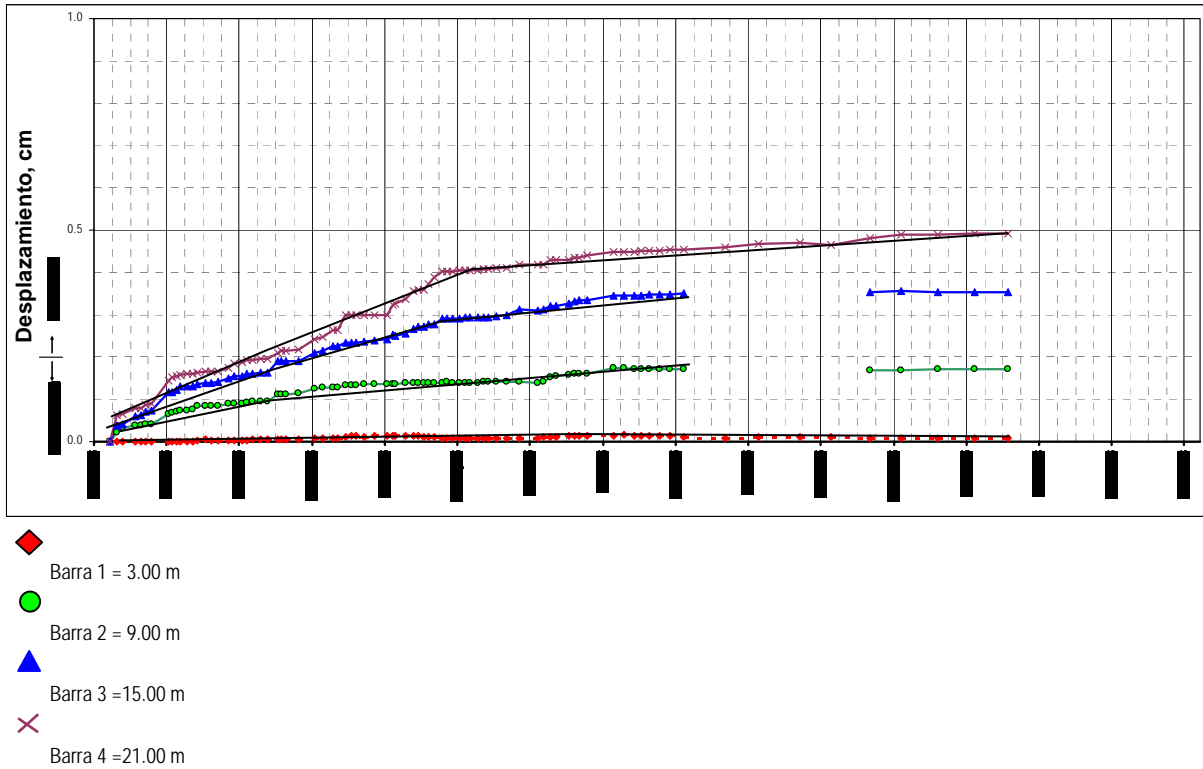


Gráfico.33 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAB14

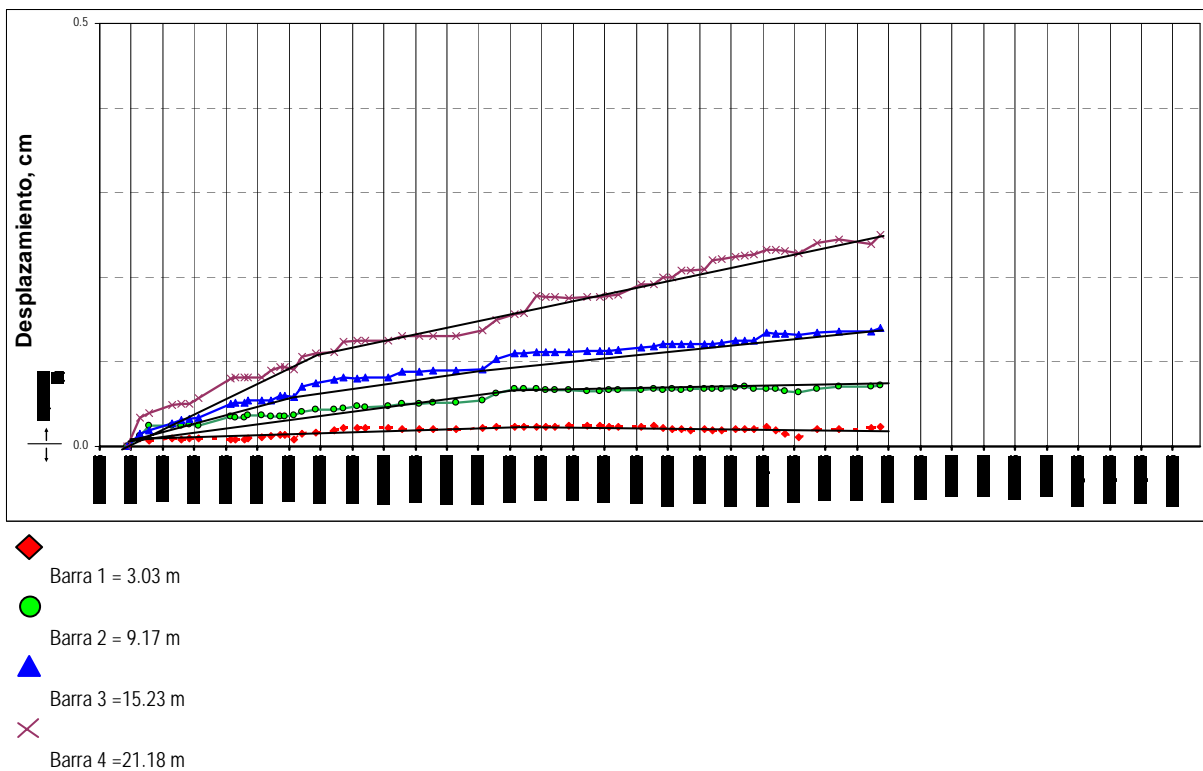


Gráfico.34 Casa de Máquinas Extensómetro EB-CMPAB15

En las tablas 7 a 9 se presentan los desplazamientos acumulados registrados y la velocidad de deformación desde la fecha de instalación de cada uno de los extensómetros hasta el mes de Diciembre de 2005.

CASA DE MÁQUINAS				
Bóveda (mm)				
Clave	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Vel (mm/mes)
CMB01	1.950	3.120	3.490	0.042
CMB02	4.820	6.130	6.950	0.226
CMB03	0.360	0.780	1.120	0.003
CMB04	0.510	0.570	0.540	0.001
CMB05	0.300	0.730	0.670	0.001
CMB06	0.300	0.690	0.380	0.000
CMB07	0.140	0.860	0.790	0.187
CMB08	0.830	1.170	1.250	0.014
CMB09	0.070	0.010	0.020	0.0000
CMB10	0.340	0.270	0.740	4.418
CMB11	0.700	1.210	1.020	0.140

Tabla 7. Desplazamientos acumulados en la Bóveda de Casa de Máquinas

CASA DE MÁQUINAS				
Pared Aguas Arriba (mm)				
Clave	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Vel (mm/mes)
CMPAR01	0.016	0.049	0.071	0.017
CMPAR02	0.027	0.108	0.167	0.005
CMPAR03	0.108	0.455	0.413	0.008
CMPAR04	0.444	0.71	0.726	0.048
CMPAR05	0.548	1.237	0.868	0.052
CMPAR06	0.433	1.14	1.431	0.051
CMPAR07	0.066	0.346	1.654	0.067
CMPAR08	0.018	0.208	0.041	0.079
CMPAR09	0.430	1.900	0.431	0.060

Tabla 8. Desplazamientos acumulados en la Pared Aguas Arriba de Casa de Máquinas

CASA DE MÁQUINAS					
Pared Aguas Abajo (mm)					
Clave	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Barra 4	Vel (mm/mes)
CMPAB01	0.153	0.234	0.347	0.454	0.0208
CMPAB02	153	0.477	0.713	1	0.0256
CMPAB03	0.147	0.305	0.516	1.121	0.0052
CMPAB04	177	0.258	0.415	0.952	0.0216
CMPAB05	0.122	0.169	0.251	0.239	0.0296
CMPAB06	0.038	0.202	0.345	0.448	0.0032
CMPAB07	Extensómetro perdido				
CMPAB08	----	0.382	0.483	0.744	0.0288
CMPAB09	0.993	1.317	1.743	2.058	0.0316
CMPAB10	0.045	0.08	0.321	0.564	0.020
CMPAB11	0.017	0.095	0.197	0.384	0.0080
CMPAB12	0.065	0.126	0.376	0.514	0.0080
CMPAB13	0.029	0.191	0.348	0.661	0.0476
CMPAB14	0.608	0.172	0.354	0.491	0.0092
CMPAB15	0.023	0.071	0.14	0.251	0.1228

**Tabla 9. Desplazamientos acumulados en la Pared Aguas Abajo de Casa de Máquinas**

#### 4.2.2 Galería de Oscilación

Con base en las gráficas (Gráficos 35 al 48) se observa el siguiente comportamiento en cada una de las estructuras que constituyen la Galería de Oscilación.

##### *Pared aguas arriba*

En la pared aguas abajo el extensómetro EB-GOPAR01 presentó en el mes de Marzo de 2005 voladuras para banqueo y limpieza de cabezal retomando las lecturas en el mes de Abril del mismo año, la barra de 18 m fue obstruida por armado en el mes de Octubre, se registraron desplazamientos de 0.01 mm aproximadamente; estos desplazamientos fueron de compresión, con velocidad de deformación de 0.04 mm/mes.



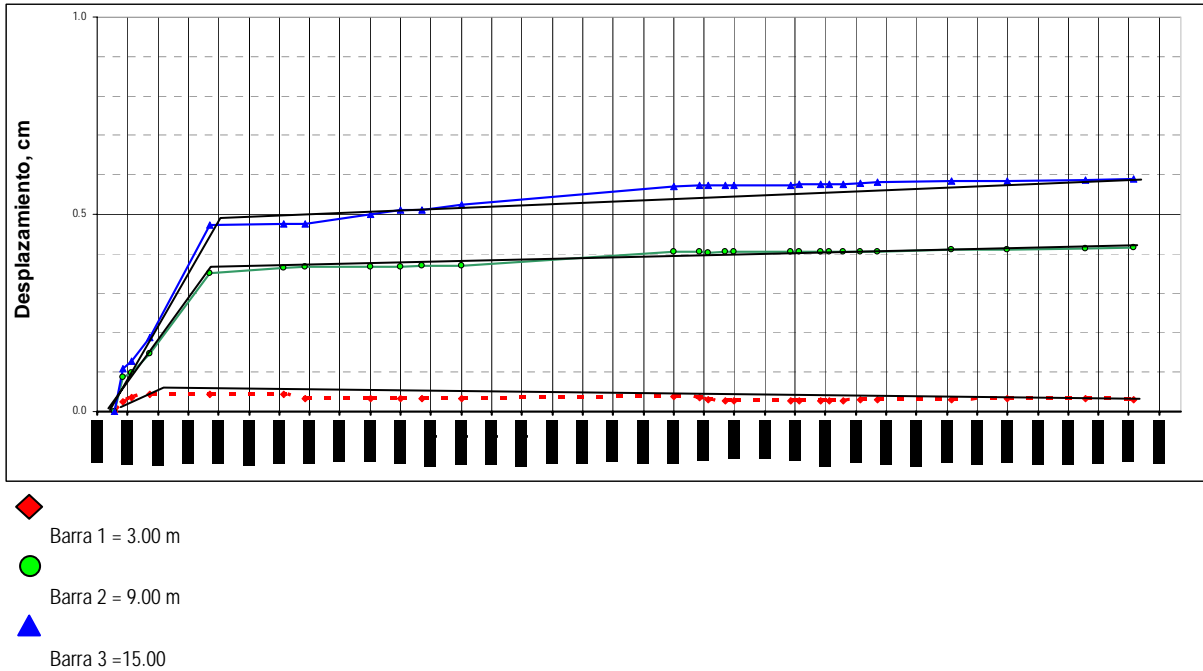


Gráfico.35 Galería de Oscilación Extensómetro EB-GOPAR01

En la pared aguas arriba el extensómetro EB-GOPAR02 fue golpeado considerando como lectura inicial 15 días después de la fecha de instalación.

Todos los extensómetros en esta zona presentan una tendencia mínima de incremento tanto en el desplazamiento como en la velocidad de deformación.

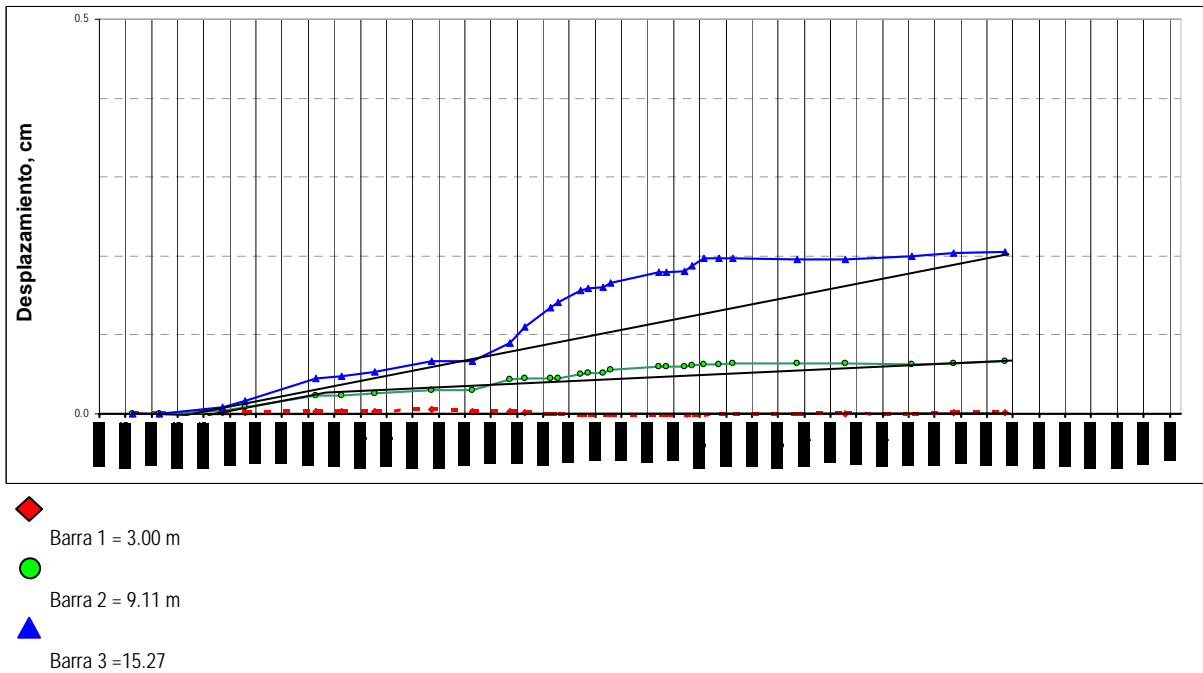


Gráfico.36 Galería de Oscilación Extensómetro EB-GOPAR02

El extensómetro EB-GOPAR03 se tiene lecturas hasta el mes de Octubre de 2005, este extensómetro se perdió en colado, presentó un desplazamiento de 0.01 mm y velocidad de desplazamiento mínima.

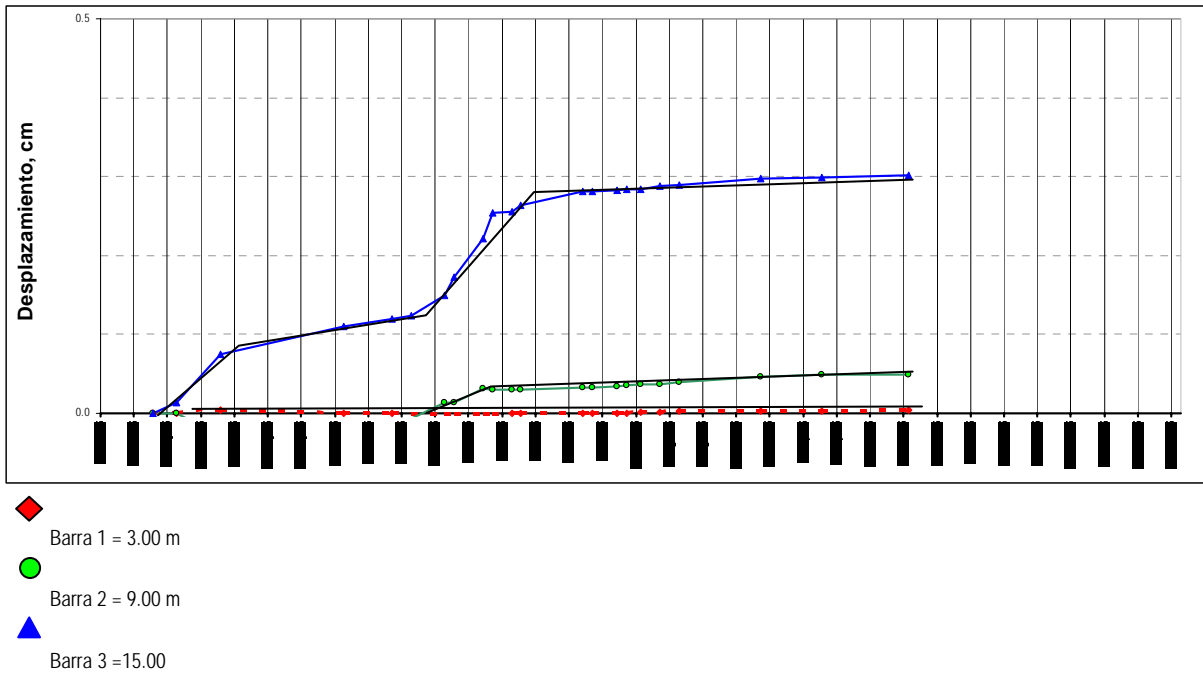


Gráfico.37 Galería de Oscilación Extensómetro EB-GOPAR03

La tendencia del movimiento de los extensómetros EB-GOPAB01, 02, 03, 04 fue de 0.01 aproximadamente, con velocidades de deformación menores a 0.09 mm/mes.

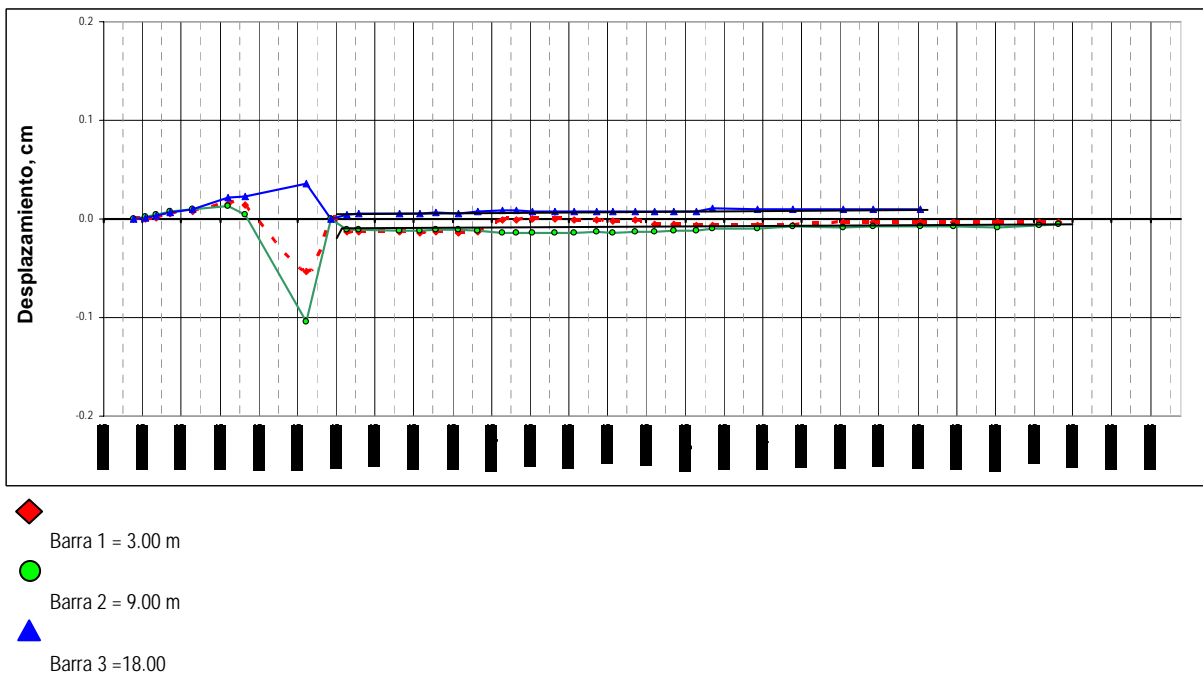
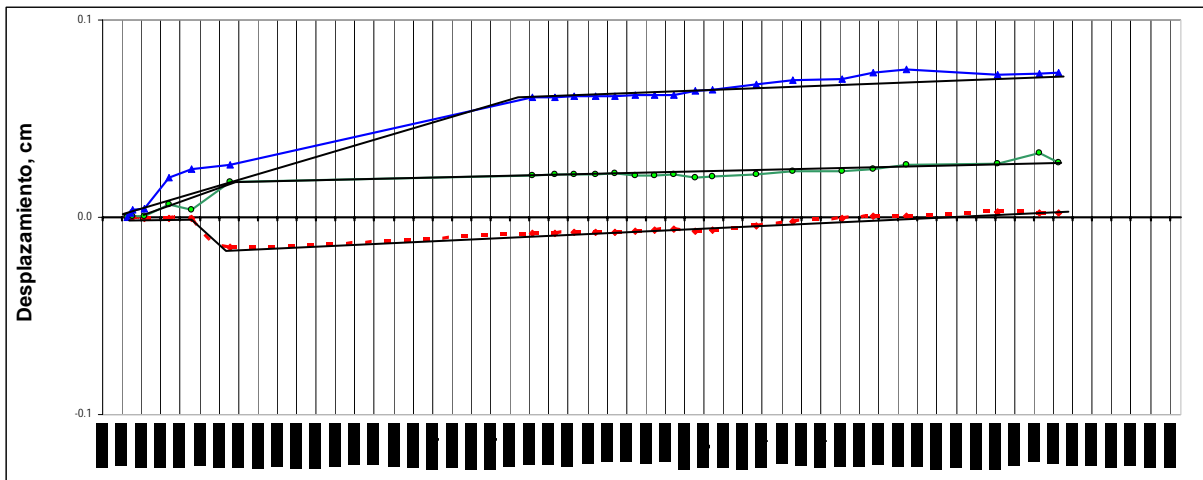
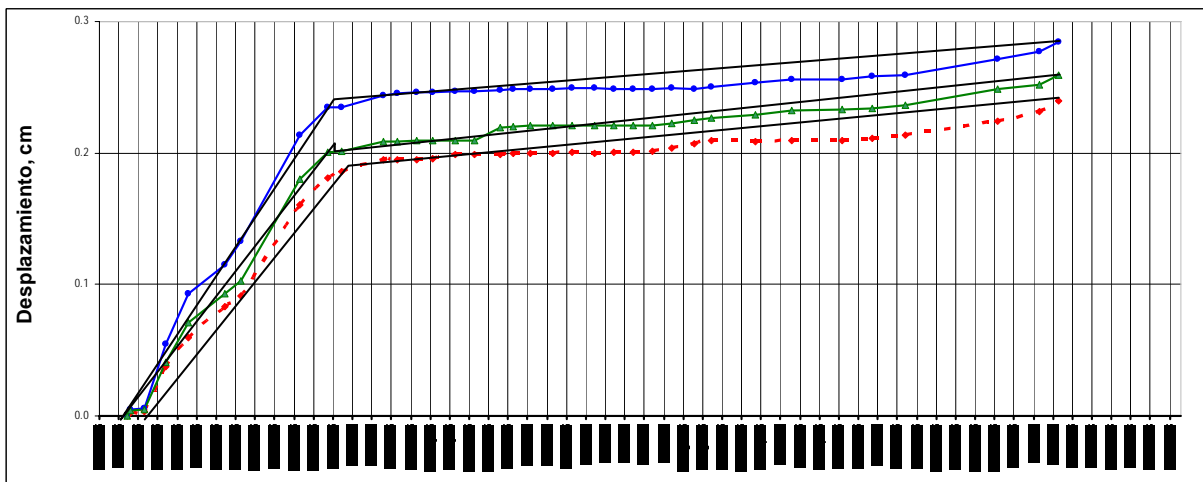


Gráfico.38 Galería de Oscilación Extensómetro EB-GOPAB01



- ◆ Barra 1 = 3.12 m
- Barra 2 = 9.17 m
- ▲ Barra 3 = 18.07 m

Gráfico.39 Galería de Oscilación Extensómetro EB-GOPAB02



- ◆ Barra 1 = 3.23 m
- Barra 2 = 9.18 m
- ▲ Barra 3 = 18.12 m

Gráfico.40 Galería de Oscilación Extensómetro EB-GOPAB03

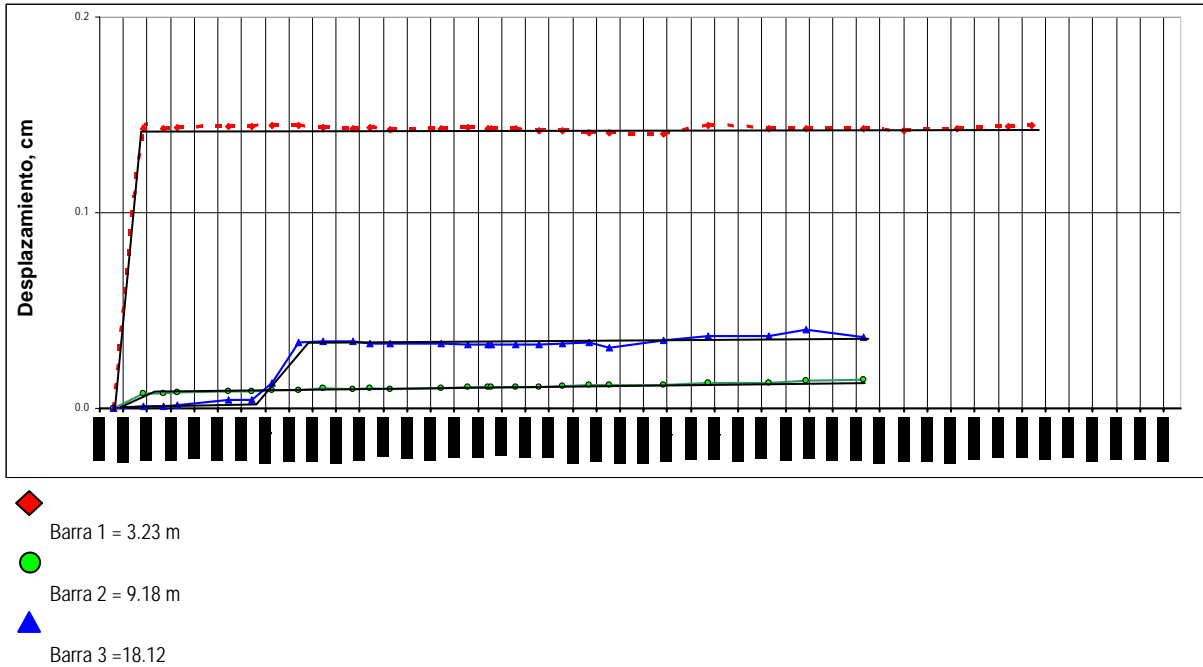


Gráfico.41 Galería de Oscilación Extensómetro EB-GOPAB04

El extensómetro EB-GOPAB05 se tiene lecturas hasta el mes de Octubre de 2005 ya que no se tiene acceso, las barras de 3 y 9 m presentaron una compresión mínima.

Cuando finalizaron las voladuras en abril, los movimientos fueron mínimos en todos los extensómetros y no ha observado tendencia alguna de expansión ni compresión representativas.

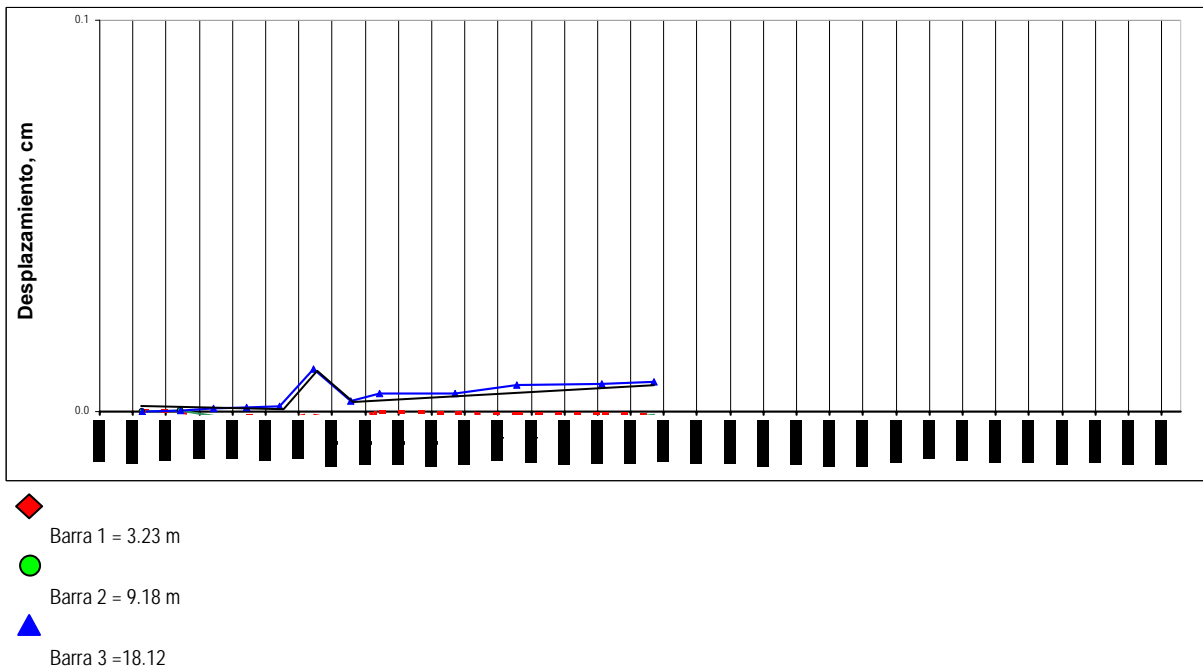
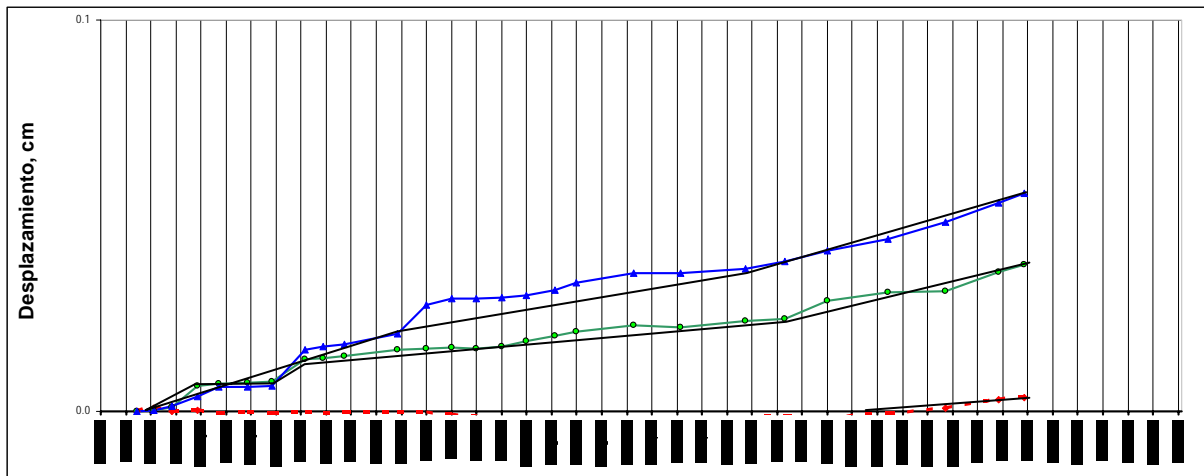
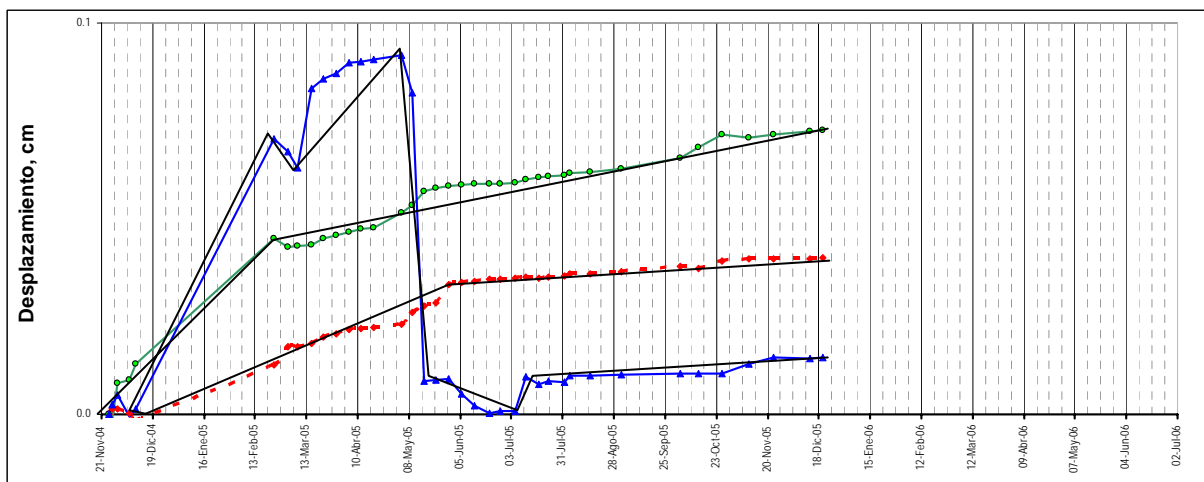


Gráfico.42 Galería de Oscilación Extensómetro EB-GOPAB05



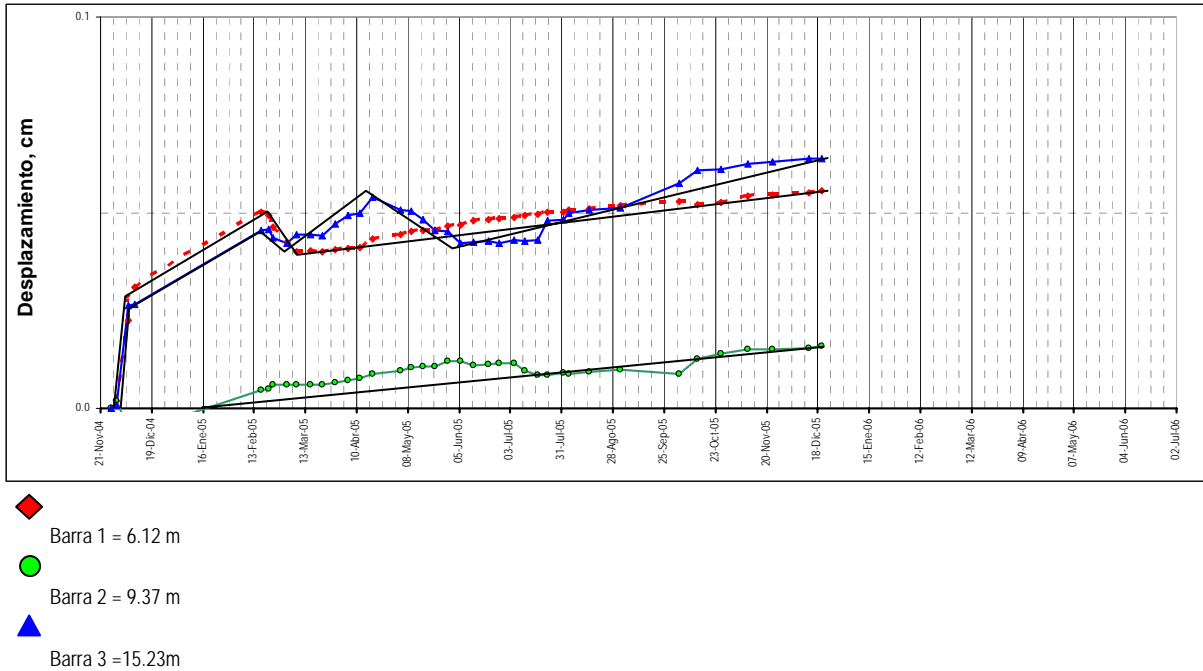
- ◆ Barra 1 = 3.23 m
- Barra 2 = 9.18 m
- ▲ Barra 3 = 18.12

Gráfico.43 Galería de Oscilación Extensómetro EB-GOPAB06

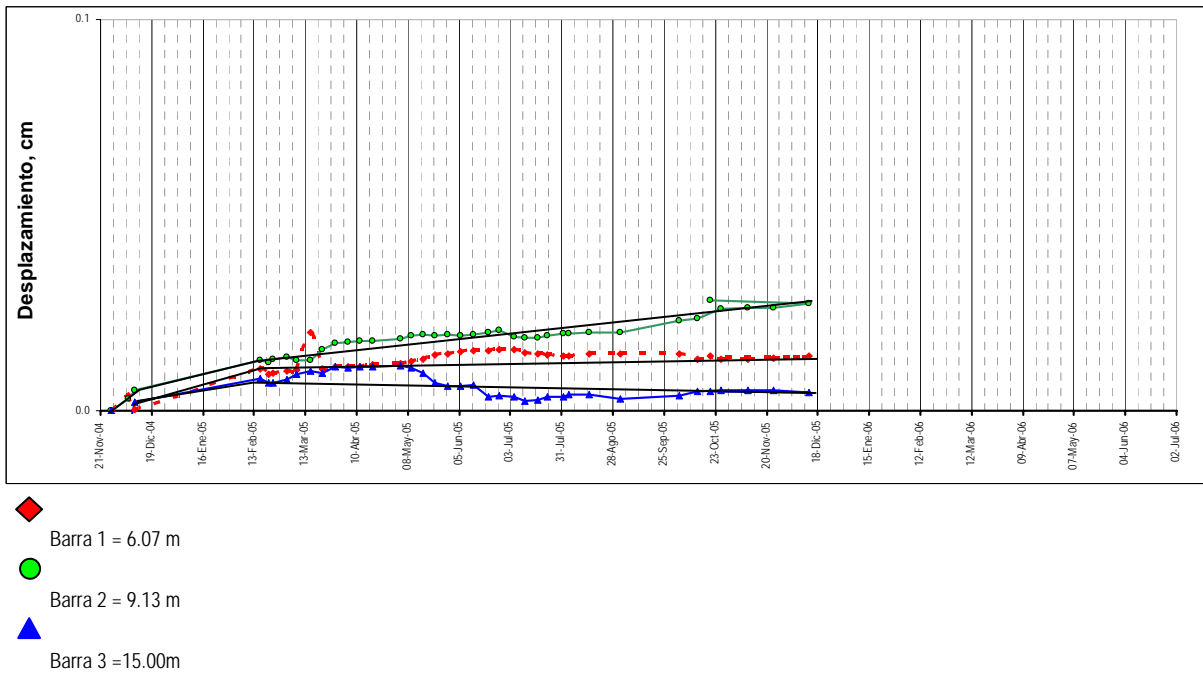


- ◆ Barra 1 = 6.00 m
- Barra 2 = 9.00 m
- ▲ Barra 3 = 15.00

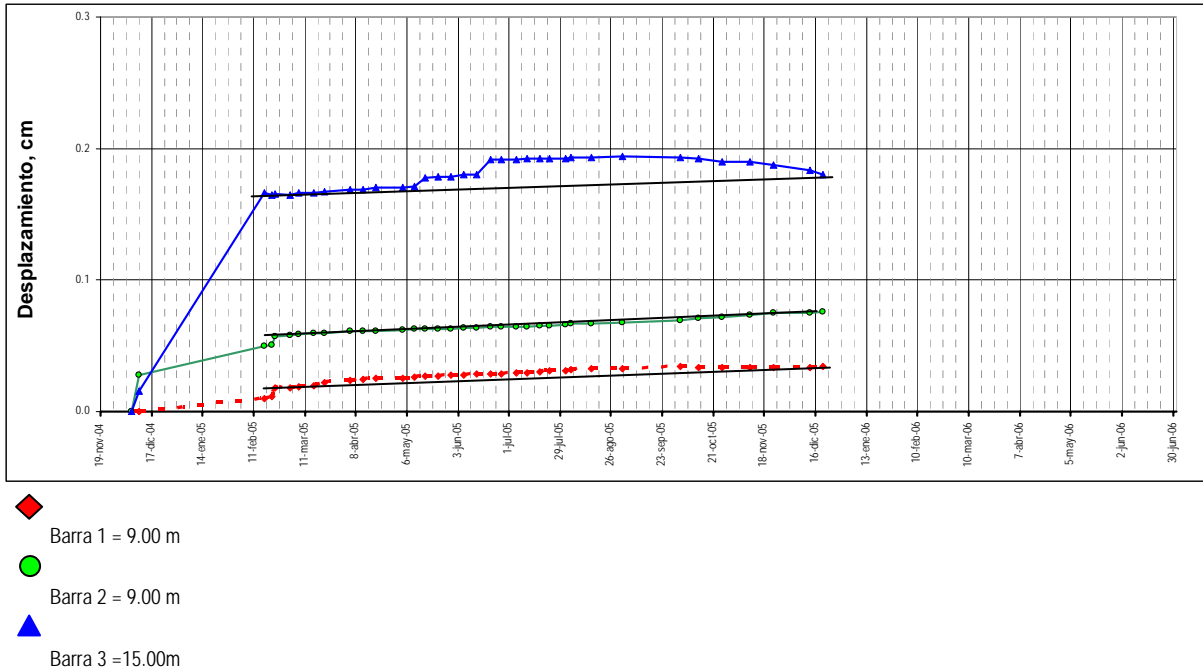
Gráfico.44 Galería de Oscilación Extensómetro EB-GOB01



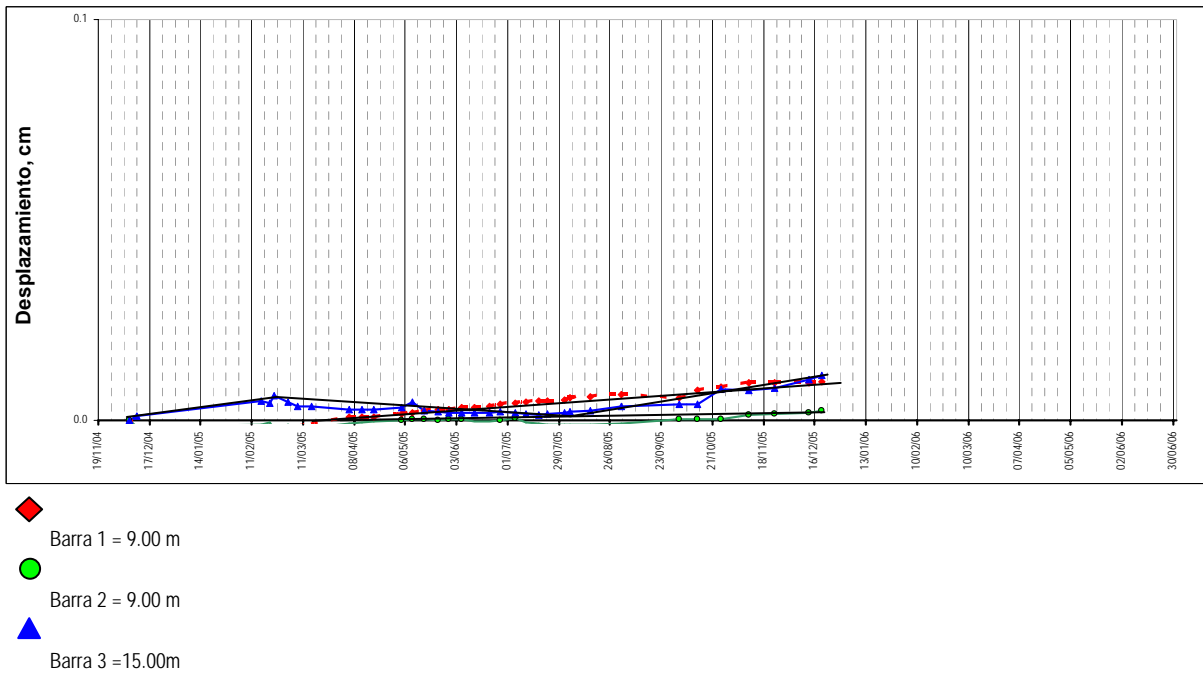
**Gráfico.45 Galería de Oscilación Extensómetro EB-GOB02**



**Gráfico.46 Galería de Oscilación Extensómetro EB-GOB03**



**Gráfico.47 Galería de Oscilación Extensómetro EB-GOB04**



**Gráfico.48 Galería de Oscilación Extensómetro EB-GOB05**

En la Galería de Oscilación no se identifican zonas inestables. El extensómetro EB-GOB06 no tuvo mediciones por falta de acceso.

En las siguientes tablas se presentan los desplazamientos acumulados y las velocidades de deformación registrados desde la fecha de instalación de cada uno de los extensómetros hasta el mes de Diciembre de 2005.

GALERÍA DE OSCILACIÓN				
Bóveda (mm)				
Clave	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Vel (mm/mes)
GOB01	0.4	0.73	0.15	0.0004
GOB02	0.56	0.16	0.64	0.0056
GOB03	0.14	0.28	0.05	0.0001
GOB04	0.34	0.76	1.8	0.0016
GOB05	0.09	0.02	0.11	0.0004
GOB06	Extensómetro perdido			

Tabla 10. Desplazamientos acumulados en la Bóveda de Galería de Oscilación

GALERÍA DE OSCILACIÓN				
Pared Aguas Arriba (mm)				
Clave	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Vel (mm/mes)
GOPAR01	0.031	0.415	0.589	0.0048
GOPAR02	0.001	0.066	0.205	0.00432
GOPAR03	0.004	0.05	0.301	0.00254

Tabla 11. Desplazamientos acumulados en la Pared Aguas Arriba de Galería de Oscilación

GALERÍA DE OSCILACIÓN				
Pared Aguas Abajo (mm)				
Clave	Barra 1	Barra 2	Barra 3	Vel (mm/mes)
GOPAB01	-0.003	-0.006	0.01	0.0012
GOPAB02	0.002	0.028	0.073	0.0004
GOPAB03	0.24	0.285	0.259	0.0528
GOPAB04	0.145	0.015	0.036	0.0004
GOPAB05	-0.001	-0.001	0.008	0.0004
GOPAB06	0.003	0.038	0.056	0.0068

Tabla 12. Desplazamientos acumulados en la Pared Aguas Abajo de Galería de Oscilación

En general el comportamiento de las excavaciones presentó un comportamiento de relajación, lo que ocasionó un ligero "cierre" de ambas cavernas.



## **CONCLUSIONES**

De los datos analizados en Casa de Máquinas y Galería de Oscilación, se puede observar que para que un sistema de auscultación resulte efectivo para detectar un problema, deberá ser capaz de registrar eventos en puntos particulares cubriendo adecuadamente la zona y realizando observaciones durante periodos de tiempo regulares. Siempre se deberá tener una máxima cobertura en los sitios donde existan dificultades como zonas de fallas geológicas. No se debe decidir la instalación de ningún instrumento hasta no haber realizado un estudio que lo justifique.

Al excavar la caverna de la Casa de Máquinas, la relajación de los esfuerzos en la roca se manifestó por pequeños movimientos registrados con los extensómetros. La pared aguas arriba ha sido la de mayores movimientos y es notable que después de las últimas voladuras, efectuadas en marzo, se hayan mantenido estables.

Las gráficas presentan pendientes, por lo que no se puede generalizar que estén estables durante el periodo de construcción. Una vez concluidos dichos trabajos de voladuras cercanos en la zona de nuestro estudio la velocidad de deformación en ambas estructuras fueron mínimas.

Al mes de Diciembre de 2005 los valores máximos de los desplazamientos registrados por los extensómetros se observan en las barras de 18 m de Casa de Máquinas, siendo menores a un milímetro.

Respecto a la bóveda se tiene una expansión de la roca; hay que mencionar que en esta zona se tiene mayor desplazamiento en las paredes por las excavaciones para la tubería de presión y los valores desminuyen a medida que los aparatos se encuentran más cercanos a la playa de montaje.

En la Galería de Oscilación los desplazamientos medidos con extensómetros son muy pequeños del orden de un milímetro en casi un año de mediciones. Cabe mencionar que, los movimientos observados fueron tanto de expansión en bóveda, como de compresión en la zona de pared aguas abajo, aunque éstos fueron mínimos.

En general las estructuras se han comportado de acuerdo a lo esperado en el diseño, y así lo demuestra el sistema de auscultación, por lo que no ha sido necesario tomar medidas adicionales a las del proyecto para estabilizar algunas de estas estructuras.

Los datos analizados corresponden a la etapa de construcción y será necesario seguir monitoreando el comportamiento de las estructuras para garantizar su adecuado comportamiento a largo plazo.

**BIBLIOGRAFIA**

“Informe geológico en la etapa de preconstrucción para el Proyecto Hidroeléctrico El Cajón, Nay.” Departamento de Geología. Superintendencia de Estudios Zona Pacífico Norte, Julio 1995.

“Anexo F del informe geológico en la etapa de preconstrucción para el Proyecto Hidroeléctrico El Cajón, Nay.” Departamento de Geología. Superintendencia de Estudios Zona Pacífico Norte, Julio 1995.

“P.H. El Cajón, Nayarit. Recomendaciones de tratamientos de soporte y drenaje de la roca para la excavación de la obra de generación”. Informe 02-111-SGM/R, Octubre 2002.

“Informe de instrumentación, Octubre 2005” Proyecto Hidroeléctrico El Cajón. Comunicación externa.

“Terraplén de prueba Proyecto Hidroeléctrico El Cajón”, Art. Macedo Gómez Gabriel, Zúñiga Arreola Javier, Ingenieros especializados CFE.

“Manual de Mantenimiento de Obras Civiles. Casa de Máquinas”. Subdirección de Generación, Subgerencia de Ingeniería Civil. CFE.

“Aplicación de la instrumentación geotécnica en el P.H. Peñitas, Chis. Observación del comportamiento durante su construcción y hasta el primer llenado del embalse.”. Tesis. Vargas Camacho Antonio, 1989

“Comportamiento de presas construidas en México,”. SRH, CFE, UNAM. Parte 1

“P.H. El Cajón, Nayarit. Tercer informe de comportamiento a Octubre de 2005. 841.01/130/05. Subgerencia de Seguridad de Estructuras, CFE”. Morales Amaya J.

“P.H. El Cajón, Nayarit. Cuarto informe de comportamiento. 841.01/140/05. Subgerencia de Seguridad de Estructuras, CFE”. Morales Amaya J.

**AGRADECIMIENTOS**

Se agradece a la Comisión Federal de Electricidad de México su anuencia para la elaboración de este proyecto